



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PESQUISA**

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA – PIBIC**

**ESTUDOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO PARA A APLICAÇÃO EM OBRAS DE
INFRAESTRUTURA DE TERRA**

Área do conhecimento: Engenharias
Subárea do conhecimento: Engenharia Civil
Especialidade do conhecimento: Geotécnica

Relatório Parcial
Período da bolsa: de (08/2017) a (07/2018)

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PIBIC/FAPITEC

Orientador: Prof. DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante
Autor: Jéssica Horta França Menezes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solo expansivo em período de longa estiagem.....	12
Figura 2 - Arranjo Mineralógico dos argilominerais.....	14
Figura 3 - Exposição da dupla camada difusa.	16
Figura 4 - Densidade seca x teor de umidade.....	20
Figura 5 - Lixão Santa Maria.....	21
Figura 6 - Escavação do solo argiloso.....	30
Figura 7 - Solo argiloso nas bandejas para secagem.	31
Figura 8 - Organograma das etapas para a realização da pesquisa.....	32
Figura 9 - Amostras das misturas de RCD com o solo.....	33
Figura 10 - Peneiramento	34
Figura 11 - Sedimentação	34
Figura 12 - Ensaio de Massa específica Real.	35
Figura 13 - Ensaio de Compactação.....	37
Figura 14 - Ensaio de compactação.....	37
Figura 15 - Corpo de Prova em pressão atmosférica.....	38
Figura 16 - Curva Granulométrica do Solo Natural.	39
Figura 17 - Curva de Compactação do Solo Natural.....	41
Figura 18 - Curva granulométrica do RCD.	42
Figura 19 - Curva de compactação do resíduo puro.....	44
Figura 20 - Curva granulométrica das misturas.....	45
Figura 21 - Resumo granulométrico das misturas.....	46
Figura 22 - Resultado do Ensaio de Compactação das misturas.	48
Figura 23 - Curvas de Compactação das misturas.....	49

Figura 24 - Resultados dos ensaios de Compressão Simples.	51
Figura 25 - Comportamento da curva do ensaio Creep estático.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fatores que influenciam na expansão do solo	17
Tabela 2 - Situação que o solo se encontra, influenciando a expansão.....	17
Tabela 3 - Equipamentos utilizados na Reciclagem do RCD em canteiros de obras.....	25
Tabela 4 - Equipamentos utilizados para a reciclagem dos RCD em usinas.....	26
Tabela 5 - Comparativos - Composição do RCD.....	28
Tabela 6 - Resumo Granulométrico – Solo Natural.	40
Tabela 7 - Caracterização e Classificação geotécnica do solo natural.	40
Tabela 8 - Frações granulométricas do RCD.....	42
Tabela 9 - Caracterização e Classificação geotécnica do RCD.....	43
Tabela 10 - Caracterização e classificação geotécnica das misturas.....	47
Tabela 11 - Resultados do Ensaio de ISC e expansão do solo, RCD e misturas.....	50
Tabela 12 - Resultado do ensaio de Lottman Modificado.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 SOLOS EXPANSIVOS.....	10
1.2 A CONSTITUIÇÃO MINERALÓGICA.....	12
1.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A EXPANSÃO DE UM SOLO.....	16
1.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	18
1.3.1 ESTABILIZAÇÃO FÍSICA OU GRANULOMÉTRICA	18
1.4 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	20
1.5 NBR 15115 (2004) E NBR 15116 (2004): PROCEDIMENTOS PARA O USO DE AGREGADO RECICLADO DE RCD EM PAVIMENTAÇÃO	23
1.6 REUTILIZAÇÃO DO RCD	23
1.7 MÉTODOS DE REUTILIZAÇÃO DOS RCD	24
1.7.1 SEGREGAÇÃO, ARMAZENAMENTO E REUSO NA PRÓPRIA OBRA	24
1.7.2 SEGREGAÇÃO DOS RCD NO PRÓPRIO CANTEIRO DE OBRAS EM DIFERENTES UNIDADES DE PROCESSAMENTO.....	25
1.7.3 RECICLAGEM DOS RCD EM USINAS DE RECICLAGEM	25
1.8 APLICAÇÕES DO RCD RECICLADO.....	26
1.9 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO DO RCD.....	27
1.10 CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE (CAUQ).....	28
2. OBJETIVOS.....	29
2.1 OBJETIVO GERAL	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 MATERIAIS	30
3.1.1 SOLO.....	30
3.1.2 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO DE DEMOLIÇÃO	31
3.2 MÉTODOS	32
3.2.1 MISTURA DO SOLO COM O RCD	33
3.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	34
3.2.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	34
3.2.2.2 DENSIDADE REAL	35
3.2.2.3 LIMITES DE ATTERBERG	35
3.2.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	36
3.2.4 ENSAIOS DO CBUQ.....	37
3.2.4.1 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	37
3.2.4.1.1 CREEP ESTÁTICO.....	37
3.3.4.1.2. LOTTMAN MODIFICADO	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO PURO	39
4.2. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICAS DO RCD PURO	41
4.3. MISTURAS SOLO-RCD.....	44

4.3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICAS DAS MISTURAS	44
4.4 COMPACTAÇÃO	48
4.5 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA	49
4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	51
4.7 ENSAIOS <i>LOTTMAN</i> MODIFICADO.....	52
4.8 ENSAIO DE <i>CREEP</i> ESTÁTICO	53
5. CONCLUSÕES	55
6. PERSPECTIVAS.....	56
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	57
8. OUTRAS ATIVIDADES.....	64
APÊNDICE	65
APÊNDICE A - GRÁFICO DE LL COM 40% DE RCD	66
APÊNDICE B - GRÁFICO DE LL COM 50% DE RCD.....	67
APÊNDICE C - GRÁFICO DE LL COM 60% DE RCD	68
APÊNDICE D - GRÁFICO DE ISC 40% RCD E 60% SOLO.....	69
APÊNDICE E - GRÁFICO DE ISC 50% RCD E 50% SOLO.....	70
APÊNDICE F - GRÁFICO DE ISC 60% RCD E 40% SOLO	71
APÊNDICE G – GRÁFICO DE ISC 100% RCD	72

1. INTRODUÇÃO

1.1 Solos expansivos

Os solos são sistemas constituídos por um conjunto de partículas com água (ou outro líquido) e ar nos espaços intermediários, onde as partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar-se entre si (Pinto, 2006).

Foram realizados estudos em várias regiões do mundo que comprovaram que a existência de diferentes tipos de solos é controlada por cinco fatores principais: Clima, organismos, material de origem, relevo e idade da superfície do terreno. Os diferentes tipos de rocha são agrupados em três classes principais - ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas - em função de sua origem, ou seja, do seu processo de formação. As rochas a) magmáticas, por exemplo, resultam do resfriamento e endurecimento do magma originado nas regiões profundas da crosta terrestre, podendo ser intrusivas ou extrusivas, b) as rochas sedimentares resultam da compactação e consolidação dos sedimentos sob elevadas pressões ou de sua cimentação por minerais. As pressões que promovem a compactação e consolidação dos sedimentos, criando uma forte ligação entre suas partículas, provêm do peso de material sobrejacente de grande espessura. Já c) as metamórficas são formadas de outros tipos de rocha, magmáticas ou sedimentares, pela ação da temperatura e pressão, isoladamente ou em conjunto, associadas em alguns casos à atividade química das soluções aquosas e gases que circulam nos espaços existentes nas rochas. (ALVES,2017)

Entre os solos, há aqueles que são influenciados pela presença da água, como os solos sedimentares argilosos, enquanto que outros não, como por exemplo os solos granulares como areias e os pedregulhos. Os solos que são muito influenciados pela presença da água nos seus vazios podem ser divididos em duas classes: os solos colapsíveis e os solos expansivos. No primeiro caso, ao ser saturado o solo sofre uma redução brusca dos seus vazios. Por outro lado, os solos expansivos aumentam de volume ao serem saturados. Em ambos os casos, a ocorrência gera problemas para as obras sobre ele apoiadas, caso nenhum tratamento especial seja aplicado para inibir o efeito do umedecimento.

Segundo Barbosa (2013), o solo pode se expandir sem ser um solo expansivo. Ainda de acordo com o autor, a expansão não é uma característica única de solo expansivo, pois

qualquer estrutura carregada, ao receber um alívio de carga poderá sofrer aumento de volume do solo devido ao alívio de tensão. A autora deste relatório se contrapõe à opinião de Barbosa (2013), uma vez que o aumento de volume ocasionado por alívio de tensões pode ocorrer com qualquer solo, como resultado da recuperação elástica da estrutura do deste, caso a ruptura não tenha sido alcançada.

De acordo com Da Silva (2005), um solo pode ser considerado potencialmente expansivo quando este apresenta variações de volume diante da variação da umidade ou da sucção, sendo constituído na sua fração mais fina por minerais expansivos. Geralmente, estes tipos de solos possuem baixa drenagem e atividade elevada (BARBOSA VALQUÍRIA, 2013).

Esses tipos de solos são encontrados nos cinco continentes, e são frequentemente presentes em regiões áridas e semiáridas. Segundo Murthy (2003), problemas envolvendo solos expansivos têm sido detectados em várias partes do mundo. Dentre os países com as maiores ocorrências, estão Austrália, Estados Unidos, Canadá, China, Israel, Índia e Egito. Em alguns países subdesenvolvidos, os edifícios foram construídos sem qualquer conhecimento da presença de solos expansivos. Isso foi em parte devido à falta de evidências históricas. Assim, com o rápido desenvolvimento de infraestrutura urbana, problemas envolvendo o comportamento de solos expansivos se tornaram mais evidentes. Há, portanto, uma necessidade de se abordar problemas associados a este tipo de solo (NG & MENZIES, 2007).

Alguns pesquisadores identificaram os solos expansivos nas regiões Sul, Centro Sul, Norte e Nordeste. (SOBRAL, H.S, 1956; SIMMES, et al, 1951; COSTA NUNES, et al, 1952; VARGAS, 1985; SANTOS, 1989). Isso facilita que os problemas associados a expansão dos solos sejam mais evidentes, ao passo que, o estudo do mesmo, será mais fácil.

Na Figura 1, pode ser visto o efeito de um solo expansivo em períodos de longa estiagem.

Figura 1 - Solo expansivo em período de longa estiagem.



Fonte: Revista Público, 2012

A construção de obras sobre esses tipos de solos, quando forem umedecidos, pode gerar sérios problemas à edificação. Um diagnóstico preliminar em campo é feito com base na observação de fissuras ou fendas características nas estações de estiagem. Já nas edificações, existem fissuras diagonais embaixo das janelas, ondulações acima das portas e rupturas nos pavimentos, fissuras generalizadas, longitudinais e transversais junto a bueiros, entre outros (PAIVA, ALVES, & LIMA, 2016).

1.2 A Constituição Mineralógica

Sabe-se que todas as argilas são constituídas essencialmente por pequenas estruturas cristalinas com um número restrito de minerais denominados argilominerais. Elas podem ser compostas por apenas um tipo de argilomineral ou por uma mistura de diferentes argilominerais. Além da sua composição química já mencionada, também podem se fazer presentes nas argilas, matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo (SANTOS, 1989).

Para um solo ter comportamento expansivo, o argilomineral presente em sua microestrutura tem papel fundamental, uma vez que nem todos os minerais argilosos experimentam modificações volumétricas. Esta instabilidade pode ser especialmente importante nas argilas esmectíticas, em especial, a montmorilonita e a vermiculita, conforme mencionado por Ataíde e Ferreira (2016).

Ainda de acordo com Ataíde e Ferreira (2016), dois requisitos básicos são necessários para um solo exibir expansividade, ou seja, a existência de fatores:

- i) Intrínsecos – deve existir e entrar em funcionamento mecanismos, em nível microescalar, que produzam a instabilidade volumétrica do solo (composição mineralógica, textura e estrutura);
- ii) Extrínsecos – deve estar presente, forças capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo (climatologia, hidrogeologia, vegetação, ocupação antrópica).

Os argilominerais são formados pela união de camadas tetraédricas e octaédricas dispostos em camadas alternadas. As espécies mais comuns são: Ilita, Caulinita e Montmorilomita. Caulinita: constituinte de rochas sedimentares detríticas e das argilas dos solos. Originária dos aluminossilicatos é refratária e não expansiva. Montmorilomita: constituinte das rochas sedimentares detríticas e das argilas dos solos originária da alteração dos aluminossilicatos e minerais ferromagnesianos. Em meio aquoso expande-se por efeito da adsorção das moléculas de água entre as cadeias tetraédrica. Ilita, também chamada de hidrômica é do grupo de argilominerais com composição e estrutura intermediária entre a muscovita e montmorilomita são comuns em folhetos de origem marinha (ATAÍDE e FERREIRA, 2016).

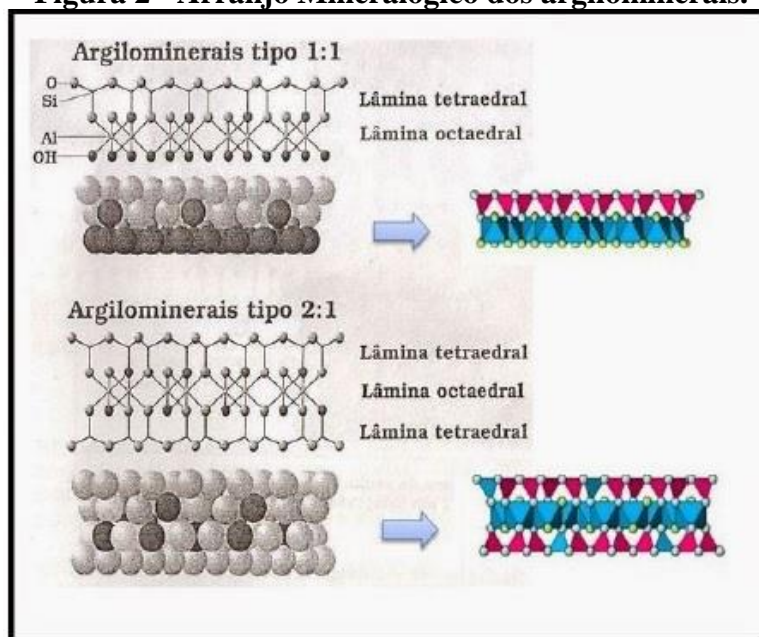
Cada tetraedro possui quatro átomos de oxigênio em volta de um átomo de silício. A junção de várias unidades tetraédricas de sílica forma uma lâmina de sílica e três átomos de oxigênio na base de cada tetraedro são compartilhados por tetraedros vizinhos. Já o octaédro é constituído por seis hidróxilos em torno do átomo de alumínio e a combinação entre octaedros gera uma lâmina octaédrica, mas também pode ser denominada de lâmina de gibsite. Algumas vezes, há a substituição de átomos de magnésio sobre os de alumínio nas unidades octaédricas e por isso, são chamadas de lâmina de brucita (DAS, 2007).

Numa lâmina de sílica, cada átomo de silício com uma carga positiva de quatro é interligado a quatro átomos de oxigênio com uma carga negativa total de oito. Entretanto, cada átomo de oxigênio da base do tetraedro se ligará a dois átomos de silício. Portanto, no momento em que cada lâmina de sílica se empilha sobre a octaédrica, os átomos de oxigênio substituem os hidróxilos presentes para o equilíbrio das cargas (DAS, 2007).

A caulinita é constituída da repetição das camadas de lâminas de sílica-gibbsita elementares em uma rede cristalina (1:1), como pode ser visto na Figura 2. Ela ocorre em lamelas com uma área da superfície das partículas cerca de $15 \text{ m}^2/\text{g}$, ressaltando que esta área de superfície por unidade de massa é denominada superfície específica. Essas camadas de lâminas são ligadas por pontes de hidrogênio (DAS, 2007).

Já a illita, usualmente denominada de hidrômica, é constituída de uma lâmina de gibbsita ligada a duas de sílica, exposto por um arranjo (2:1). As camadas de illita são interligadas por íons de potássio e a carga negativa necessária para o equilíbrio entre as cargas vem da substituição do alumínio por algum íon silício presente nas lâminas tetraédricas. Essa substituição sem nenhuma modificação na forma cristalina é denominada de substituição isomórfica. Vale ressaltar ainda que a superfície específica desse minério de argila é cerca de $80 \text{ m}^2/\text{g}$ (DAS, 2007).

Figura 2 - Arranjo Mineralógico dos argilominerais.



Fonte: Mineralogia e química do solo, 2014.

Com relação ao argilomineral montmorilonita, este possui uma estrutura similar à da illita, isto é, com um arranjo do tipo (2:1). Nele há a substituição isomorfa de magnésio e ferro por alumínio nas lâminas octaédricas. Vale salientar, que não existe a presença dos íons potássio em sua estrutura e possui uma grande quantidade de água atraída para o interior do espaço entre as camadas. A superfície específica da montmorilonita é cerca de $800 \text{ m}^2/\text{g}$. Além dos principais grupos de minerais argílicos mencionados, existem outros minerais de argila usualmente encontrados, tais como clorita, haloisita, vermiculita e a atapulgita (DAS, 2007).

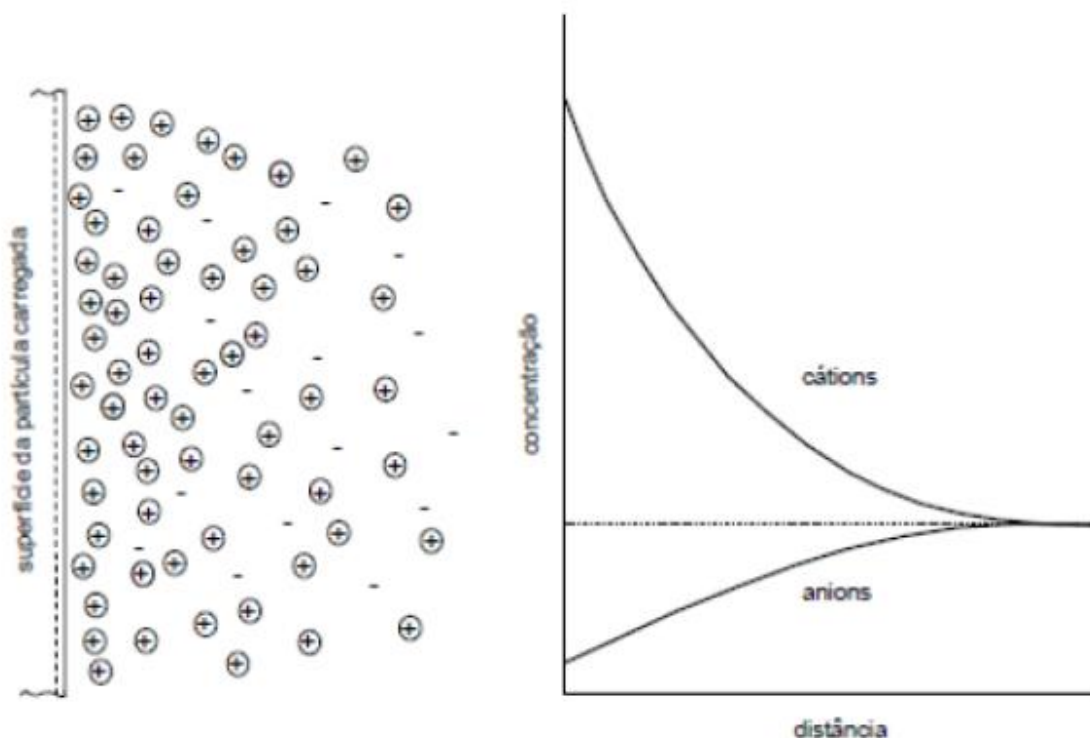
Como se pode observar na literatura, o argilomineral montmorilonita é o mais presente em solos expansivos, responsável pela maior parte da retenção de água no solo.

Quando a argila está seca, a carga negativa será equilibrada por cátions que podem ser trocáveis, tais como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} e K^{+} ao redor das partículas mantidas por atração eletrostática. No momento em que a água é adicionada à argila, os cátions e poucos ânions flutuam em torno das partículas pertencentes à argila. Essa configuração é denominada de dupla camada difusa e vale mencionar que a concentração de cátions reduz com a distância da superfície da partícula (DAS, 2007).

Além disso, a água pode ser atraída para as partículas de argila pelas pontes de hidrogênio, em que os átomos de hidrogênio nas moléculas de água são compartilhados com átomos de oxigênio na superfície da argila. Alguns cátions parcialmente hidratados na água intersticial também são atraídos para a superfície das partículas da argila e eles atraem moléculas de água dipolar (DAS, 2007).

A força de atração entre a água e argila é reduzida com a distância, e toda a água mantida nas partículas da argila pela força de atração é denominada de água de dupla camada. Sendo sua camada mais interna da dupla camada mantida fortemente pela argila e chamada de água adsorvida (DAS, 2007). Esse efeito pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Exposição da dupla camada difusa.



Fonte: Mitchell (1992) apud R. N. Campos (2015)

Deve ser reconhecida que a presença de argilominerais em um agregado de solo possui grande influência nas propriedades de engenharia do solo como um todo. No momento em que a umidade estiver presente, o comportamento de um solo modificará com o aumento da porcentagem do teor de minerais de argila (DAS, 2007).

1.2 Fatores que influenciam a expansão de um solo

Existem duas etapas para a devida identificação e classificação de um solo expansivo. A primeira delas consiste na determinação de informações prévias mediante fissuras nas edificações e informações junto aos moradores da região e a segunda, na interpretação de ensaios de laboratório e no uso de métodos de identificação (PAIVA, 2009).

Segundo Nelson (1992) há diversos fatores que influenciam o mecanismo de expansão e contração dos solos expansivos. As Tabelas 1 e 2 apresentam os principais fatores intervenientes do comportamento expansivo dos solos.

Tabela 1- Fatores que influenciam na expansão do solo (NELSON; MILLER, 1992).

FATOR	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
Mineralogia da argila	Os argilominerais que tipicamente causam variações de volume no solo são: montmorilonitas, vermiculitas e algumas camadas mistas de minerais. Ilitas e caulinitas não são freqüentemente expansivas, mas podem causar variações de volume quando o tamanho das partículas são extremamente pequenos.	Grim,(1968); Mitchell,(1973,1976) Snethen et al.,(1977)
Química da água no solo	A expansão é reduzida pelo aumento da concentração e valência de cátion. Por exemplo, cátions de Mg^{2+} na água do solo resulta em menor expansão do que os cátions de Na^+ .	Mitchell, (1976)
Sucção do solo	A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas e elétricas das partículas do solo e da água.	Snethen,(1980); Fredlund ; Morgenstern, (1977); Johnson,(1973); Olsen ; Langfelder,(1965) Aitchison et al., (1965)
Plasticidade	Em geral, solos que exibem comportamento plástico sobre larga variação de umidade e que tem alto limite de liquidez possuem maior potencial de expansão e de contração. Plasticidade é um indicador do potencial de expansão.	Nelson, J.D. et al., (1992)
Estrutura e Textura do solo	Argilas floculadas tendem ser mais expansivas do que as argilas dispersas. Partículas cimentadas reduzem a expansão. A textura e estrutura são alteradas pela compactação, maior teor de umidade ou remoldagem.	Johnson; Snethen,(1978); Seed et al.,(1962a)
Densidade Seca	Elevada densidade usualmente indica espaçamento menores entre partículas, o que pode significar grandes forças repulsivas entre elas e, elevado potencial de expansão.	Chen, (1973); Komornik; David, (1969); Uppal, (1965).

Tabela 2 - Situação que o solo se encontra, influenciando a expansão (NELSON; MILLER, 1992).

Fator	Descrição	Referencia
1.0 - Condições de umidade inicial	Um solo expansivo ressecado terá uma elevada afinidade por água ou sucção elevada, enquanto o mesmo com elevado teor de umidade diminuirá a sucção. De modo inverso, um perfil de solo úmido perderá umidade mais rápido quando exposto à secagem e contrairá mais do que um perfil de solo inicialmente seco.	
2.0 - Variações de umidade	Variações de umidade na parte superior do perfil próximo a zona ativa definem principalmente os levantamentos. É nestas camadas que ocorrerão extensas variações de umidade e volume.	Johnson, (1969)
2.1 – Clima	A quantidade e variação de precipitação e evapotranspiração influenciam fortemente a umidade e o perfil devido às variações climáticas. Em climas semi-áridos ocorrem levantamentos periódicos devido aos curtos períodos de chuva.	Holland; Lawrence, (1980)
2.2 – Água do subsolo	Lençóis rasos de água fornecem uma fonte de umidade e lençóis de águas superficiais contribuem para o aumento da umidade.	
2.3 - Drenagem e fontes de águas superficiais	Estruturas de drenagem superficiais, como por exemplo, tubulações, canaletas, etc., próximas a fundações de casas, podem se tornar uma fonte de água superficial. Vazamento de tubulações pode umidificar o solo até grandes profundidades.	Krazynski, (1980); Donaldson, (1965)
2.4 – Vegetação	Árvores, arbustos e gramas retiram a umidade do solo por transpiração, e tomam diferentemente úmido o solo para os variados tipos de vegetação.	Bucley, (1974)
2.5 – Permeabilidade	Camadas com elevada permeabilidade, particularmente devido a fissuras e rachaduras na massa de solo, permitem uma rápida migração de água e promove uma rápida velocidade de expansão.	Wise; Hudson,(1971); Debruijn,(1965)
2.6 – Temperatura	Aumentos de temperatura causam a difusão de umidade para áreas mais frias abaixo de pavimentos e edifícios.	Johnson; Strong, (1976); Hamilton, (1969)
3.0 - Condições de Tensão		
3.1 - História de tensões	Um solo sobreadensado é mais expansivo que um solo com igual índice de vazios, porém normalmente adensado. Pressões de expansão podem aumentar com o envelhecimento de argilas compactas, mas o valor de expansão sob pequenos carregamentos não tem demonstrado ser afetado pelo envelhecimento de argilas compactas. Repetidos ciclos de umedecimento e secagem tendem a reduzir a expansão em amostras de laboratório, mas após um certo número de ciclos, a expansão não é afetada.	Mitchell, (1976); Kassif; Baker, (1971)
3.2 - Condições in situ	O estado de tensão inicial no solo pode ser estimado a fim de avaliar as prováveis consequências do carregamento sob a massa de solo e/ou alteração do ambiente inerente a umidade. As tensões efetivas iniciais podem ser grosseiramente determinadas através de amostragem e testes em laboratório, ou por medidas e observações in situ.	
3.3 – Carregamento	A grandeza de sobrecarga aplicada influi quantitativamente na mudança de volume que ocorrerá, para um dado teor de umidade e densidade. Uma carga externa aplicada atua para balanceando das forças repulsivas entre partículas e reduzindo a expansão.	Holtz, (1959)
3.4 - Perfil do solo	A espessura e posição da camada potencialmente expansiva influência consideravelmente no movimento do solo. Os maiores movimentos ocorrem em perfis que tem argilas expansivas desde a superfície até a região abaixo da zona ativa. Movimentos menores ocorrerão se o solo expansivo for recoberto por material não expansivo ou leito rochoso superficial.	Holland; Lawrence, (1980)

1.3 Estabilização de solos

O controle de variações de umidade não é simples, uma vez que a água pode se deslocar vertical e horizontalmente provocando mudanças nos níveis de sucção, e consequentemente de volume, por movimentos alternados de expansão e compressão. (MILITITSKY *et al.*, 2008).

Com as medidas preventivas há a possibilidade de tornar mínimo o agravo devido às consequências da expansibilidade. Essas medidas podem ser: isolar a estrutura do material expansivo, desenvolver um projeto que reforçará a estrutura que sofrerá as consequências da variação de volume. Entretanto, para agir diretamente no problema, a alternativa é a estabilização.

Dessa forma, conforme pontuado por Neves et al. (2009), neste processo o solo melhora suas características, adquirindo assim as propriedades necessárias ao fim a que se destina. Como exemplo, é possível citar a adição de asfalto natural ou palha na produção de adobes, para diminuir a permeabilidade ou reduzir a retração, que é uma prática milenar.

A densificação, no processo por compactação ou prensagem, mistura com outros solos para melhorar suas características granulométricas (denominada estabilização granulométrica) e a adição de aglomerantes são alguns tipos de estabilizações frequentemente utilizados. As duas principais razões para a adoção de algum método de estabilização de solos são: i) melhorar a durabilidade sob ação da água; e ii) aumentar sua resistência às ações mecânicas.

1.3.1 Estabilização física ou granulométrica

Segundo Pinto (2008), neste tipo de estabilização as propriedades do solo são modificadas, alterando-se a sua textura. Existem algumas técnicas de estabilização física do solo, dentre as quais é possível citar a correção granulométrica ou a adição de fibras (metálicas, minerais, sintéticas ou vegetais) (PINTO, 2008).

A correção granulométrica é adotada quando se deseja, por algum motivo específico, alterar a distribuição das partículas do solo. Segundo Barbosa et al. (2002), o teor de cada fração é relevante. O autor ainda recomenda que para os solos utilizados na

confeção de blocos prensados, a faixa desejável de cada tamanho: 10 a 20 % de argila, 10 a 20 % de silte e 50 a 70 % de areia.

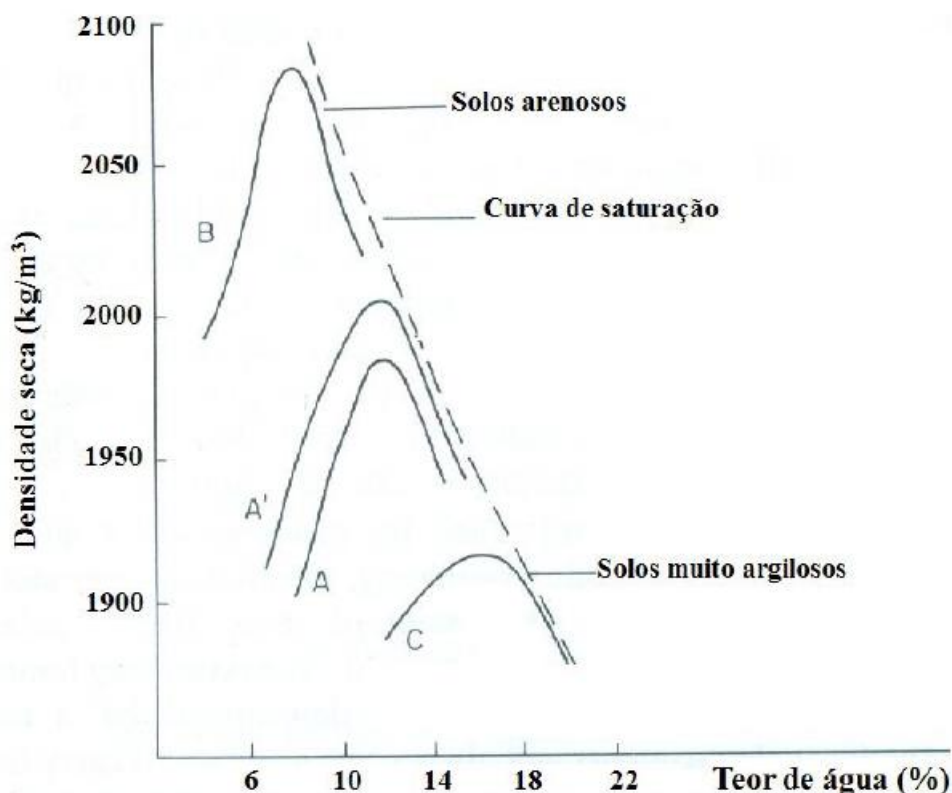
1.3.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica consiste em aplicar uma carga ao solo, compactando-o. De acordo com Spence e Cook (1983), a finalidade da compactação é elevar a densidade do solo, aumentando ao mesmo tempo a sua resistência. Para que a compactação atinja melhores resultados, solos que possuam grãos de variados tamanhos e com uma pequena quantidade de argila são preferíveis. Os autores afirmam ainda que as melhores técnicas de construção com solo são aquelas nas quais a compactação é utilizada, mas para resultados ainda melhores, tal técnica pode ser combinada com a adição de um aglutinante ou um impermeabilizante.

Gondim (2008) também explica que os métodos de estabilização Mecânica são os procedimentos que alteram apenas o arranjo das partículas do solo ou a granulometria deste. Para tal faz-se uso do processo de compactação do solo, no qual há uma redução do volume de vazios, o que tem relação com o ganho de resistência (SANTOS et al., 1995).

A Figura 4 abaixo demonstra a variação da densidade seca máxima e da umidade ótima com o tipo de solo. Solos muito argilosos (Curva C) tem menores densidades secas e maiores umidades ótimas. Já os solos arenosos (Curva B) possuem maiores densidades secas e menores umidades ótimas. Para um mesmo solo, se a energia de compactação aumenta, a curva move-se de A para A', ou seja, a densidade seca aumenta, mantendo-se o valor da umidade ótima.

Figura 4 - Densidade seca x teor de umidade.



Fonte: (SPENSE & COOK, 1983).

1.4 Resíduo de construção e demolição

Segundo a Resolução nº. 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2002), os resíduos de construção civil são: “os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha (CONAMA, 2002).”

Na grande maioria dos municípios, a maior parte desse resíduo é depositada em bota-fora clandestino, nas margens de rios e córregos ou em terrenos baldios. A deposição irregular de entulho, segundo Mendes et al. (2004), ocasiona proliferação de vetores de doenças, entupimento de galerias e bueiros, assoreamento de córregos e rios, contaminação de águas superficiais e poluição visual. Isso pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Lixão Santa Maria.



Fonte: Jornal Contexto, 2011.

O ônus desta irracionalidade é distribuído por toda a sociedade, não só pelo aumento do custo final das construções como também pelos custos de remoção e tratamento do entulho. Na maioria das vezes, esse resíduo é retirado da obra e disposto clandestinamente em locais como terrenos baldios, margens de rios e de ruas das periferias, gerando uma série de problemas ambientais e sociais, como a contaminação do solo por gesso, tintas e solvente; a proliferação de insetos e outros vetores contribuindo para o agravamento de problemas de saúde pública (MENDES, 2004).

É perceptível que no Brasil, além do volume gerado de (RCD), outra preocupação é como esse resíduo vem sendo descartado muitas vezes de forma inadequada. Segundo Daltro Filho *et al.* (2006), em 2004 Aracaju produzia cerca de 13,135 ton/mês de resíduo da construção civil, e aproximadamente 30% não era destinado de forma adequada.

Sabe-se que existe uma parcela que é destinada a locais permitidos pelo município, entretanto, até mesmo esse, não era feita de forma sustentável. Segundo Costa (2011), os resíduos eram acondicionados de forma incorreta na localidade denominada Terra Dura,

área considerada imprópria de acordo com a legislação ambiental, seja porque instalada sem prévio estudo de impacto ambiental, seja porque sem a expedição das licenças competentes.

Diante de todos os problemas a vida urbana e ao meio ambiente, causado pelo Resíduo da Construção e Demolição (RCD) a melhor solução é utilizá-lo como fonte de materiais para a construção civil e pavimentação. De acordo com Zordan (1997) a forma mais simples de reciclagem do entulho é a sua utilização em pavimentação (base, sub-base ou revestimento primário), na forma de brita corrida ou ainda em misturas do resíduo com solo. Isso é comprovado cientificamente devido a utilização dessa prática em diversas administrações municipais.

Aliada a tal reação desses setores tem-se a dificuldade por parte das empresas e governos municipais em criar mecanismos de gerenciamento eficazes, capazes de: Nortear um uso mais inteligente dos materiais nas frentes de trabalho, visando com isso uma redução no volume de material a ser descartado mais tarde; Contribuir com a segregação desses resíduos in loco, de modo a facilitar o seu reuso posterior; Realizar e controlar a disposição do que não pode ser submetido a processos de reciclagem ou reuso direto em locais apropriados, diminuindo com isso o surgimento de áreas clandestinas de bota-fora, que ocorrem em muitas vezes em áreas de preservação ambiental. (OLIVEIRA, 2005).

Os autores, John e Agopyan (2003), identificaram algumas ações que direcionam para a redução da geração de menos resíduo na construção civil:

- Mudanças de tecnologia para combater as perdas;
- Aperfeiçoamento e flexibilidade de projeto;
- Melhoria da qualidade de construção, de forma a reduzir a manutenção
- Causada pela correção de defeitos;
- Seleção adequada de materiais, considerando, inclusive, o aumento da
- Vida útil dos diferentes componentes e da estrutura dos edifícios;
- Capacitação de recursos humanos;
- Utilização de ferramentas adequadas;
- Melhoria da condição de estoque e transporte;
- Melhor gestão de processos;
- Incentivo para que os proprietários realizem modificações nas

- Edificações e não demolições;
- Taxação sobre a geração de resíduos;
- Medidas de controle de disposição;
- Campanhas educativas.

1.5 NBR 15115 (2004) e NBR 15116 (2004): procedimentos para o uso de agregado reciclado de RCD em pavimentação

Uma representação da ABNT, em São Paulo, elaborou no ano de 2004, com a participação de empresas privadas, as prefeituras de São Paulo e Santos, o Sinduscon-SP e a Escola Politécnica de São Paulo, a NBR 15115 (2004), norma pioneira que estabelece 13 critérios e procedimentos para o uso de RCD em camadas de pavimentação. Alguns critérios estabelecidos por essa norma são citados a seguir:

- Estabelece a NBR 9895 (1987), ou seja, o Índice de Suporte Califórnia (ISC) como parâmetro para análise da resistência relativa do material. Assim, o índice de aceite do material está ligado à resistência dos grãos e não à sua natureza;
- Caso o ISC for maior do que 12%, o material é aceito para reforço de subleito, caso o ISC chegue a 20%, o material pode ser usado como sub-base e para base o ISC deve ser superior a 60%;
- A dimensão característica do maior grão foi definida como de 63,5mm;
- Porcentagem de grãos de forma lamelar: deve ser menor que 30%;
- A espessura mínima de cada camada seja de base, sub-base ou reforço de subleito, não pode ser de 10 cm após a compactação;
- O do agregado deve ser bem graduado, como o similar natural, e não há qualquer restrição quanto à composição, podendo ser concreto, cerâmicas, pedras, sempre resíduos sólidos da construção civil Classe “A”, evitando-se os compostos das Classes “B, C e D”, materiais estes que a norma denomina de materiais indesejáveis;
- O teor máximo permitido de materiais indesejáveis é de 3% em massa, para grupos distintos, e/ou 2% em massa para materiais de mesmo grupo.

1.6 Reutilização do RCD

Segundo Levy (1997), os primeiros registros de reutilização de resíduos minerais datam da época das cidades do Império Romano, porém o desenvolvimento de tecnologias e a reciclagem maciça desses resíduos tiveram início após a 2ª Guerra Mundial. Isso, devido à grande demanda de agregados para a reconstrução dos edifícios demolidos em cidades europeias e ao grande volume de escombros resultantes das edificações demolidas.

A reutilização do RCD traz enormes benefícios ambientais e econômicos para a sociedade, como:

- Preservação das reservas de matéria prima não renováveis;
- Aumento da vida útil em aterros de inertes; e
- Economia na aquisição de agregados, com a substituição de agregados naturais por reciclados de entulho;

1.7 Métodos de reutilização dos RCD

Os métodos de reutilização dos RCD, segundo Burgoyne (2006), podem ser:

1.7.1 Segregação, armazenamento e reuso na própria obra

É um método muito vantajoso, pois o processamento desses resíduos na própria obra evita a mistura e a contaminação, além de diminuir os custos com transporte. Porém, esse método depende de algumas condições para que possa ser aplicado, como espaço para armazenamento e instalação de equipamentos e volume gerado.

Grigoli (2002) apresenta algumas atividades onde podem ser utilizados os RCD reciclados no próprio canteiro de obras:

- Concreto para a execução de pisos, vigas e pilares com baixa solicitação;
- Enchimento de rasgos de parede, degraus de escadas e casas de máquinas;
- Chumbamento de tubulações hidráulicas e elétricas;
- Contra pisos internos de unidades habitacionais;
- Drenos para escoamento de águas de chuva;
- Estaqueamento de fundações de muros com pequenas cargas.

A escolha dos equipamentos para o beneficiamento dos RCD na obra depende do tipo de produto que se deseja produzir e o volume a ser processado. Na Tabela 3 são

apresentados alguns tipos de equipamentos com a respectiva capacidade e o tipo de produto gerado.

Tabela 3 - Equipamentos utilizados na Reciclagem do RCD em canteiros de obras.

Equipamento	Produto Gerado	Capacidade de Produção (m³/h)	Abertura Boca (cm)	Motorização	Preço (Novo) R\$	Fabricante/representante Informações
Masseira - Moinho ¹	Agregados miúdos para uso em argamassa	2,00		7,5 CV	22.000,00	Anvi - http://www.anvi.com.br
Britador de Mandíbulas ¹	Agregados miúdos e grãos	2,0 a 3,0	40 x 25	20 CV	44.000,00	Piacentini - http://www.piacen.com.br/
Moinho de Martelos ²	Agregados miúdos e grãos	1,4 a 1,8	33 x 10	15,0 CV	10.000,00	
Moedor de caliça ²	Agregados miúdos e grãos	0,5 a 1,0	34 x 18	3,0 CV	5.000,00	

Fonte: Adaptado de Pinto (2002).

1.7.2 Segregação dos RCD no próprio canteiro de obras em diferentes unidades de processamento

Esse método consiste na segregação dos RCD de acordo com suas classes, no próprio canteiro de obras e posterior encaminhamento de cada tipo de resíduos para a unidade de processamento adequada. Os resíduos de metais, plástico, papel e outros podem ser vendidos ou entregues para empresas que tenham interesse na reciclagem desses materiais minimizando assim, o custo de transporte (BURGOYNE, 2006).

1.7.3 Reciclagem dos RCD em Usinas de Reciclagem

Essa metodologia é aplicada normalmente em municípios de médio e grande porte, onde o volume a se processar é considerado grande. Essa metodologia apresenta algumas desvantagens como o elevado custo com equipamentos e o baixo custo dos produtos gerados em virtude da dificuldade de segregação dos resíduos que chegam a unidade (BURGOYNE, 2006).

Para a reciclagem dos RCD Classe A (resto de argamassa, concreto, cerâmica, etc.), as centrais de reciclagem devem abrigar os processos de trituração e peneiramento, utilizando os seguintes equipamentos:

- Alimentador vibratório;
- Britador;

- Transportadores de correia;
- Separador Magnético;
- Peneira vibratória; e
- Quadro de comandos.

A escolha do equipamento de reciclagem de RCD também depende do tipo de produto que se deseja obter e o volume a se processar. A Tabela 4 apresenta os principais conjuntos de reciclagem e suas respectivas capacidades.

Tabela 4 - Equipamentos utilizados para a reciclagem dos RCD em usinas.

Conjunto de reciclagem	Produto Gerado	Capacidade de Produção	Preço Estimado R\$³
Alimentador vibratório, britador de mandíbulas tipo 4230 ¹ e transportador de correia de ação radial	Brita Corrida ⁴	14 (t/h)	145.000,00
Alimentador vibratório, britador de mandíbulas tipo 4230 e transportador de correia de ação radial, moinho de martelos, peneira vibratória elevada sobre baias fixas	Brita corrida ou agregados classificados ⁵	14 (t/h)	163.000,00
Alimentador vibratório, britador de impacto tipo 20 TPH ² e transportador de correia de ação radial	Brita Corrida	20 (t/h)	235.000,00
Alimentador vibratório, britador de impacto tipo 40 TPH e transportador de correia de ação radial, peneira vibratória e transportadores auxiliares fixos	Brita corrida ou agregados classificados	40 (t/h)	308.000,00

Fonte: Adaptado de Pinto (1999).

1.8 Aplicações do RCD reciclado

Segundo Zordan (2005), as principais aplicações dos materiais reciclados de RCD podem ser as seguintes:

- Em pavimentação: esses resíduos reciclados podem ser empregados na forma de brita corrida ou em misturas com solo, em camadas de bases, sub-bases e revestimento primário, sendo esses usos normalizados pela ABNT NBR 15115 (2016) e NBR 15116 (2016). É a forma de reciclagem que exige menor utilização de tecnologia, implicando em menor custo de processamento e permitindo a utilização de todos os componentes minerais sem a necessidade de separação.
- Agregado alternativo para o concreto: nessa aplicação, os resíduos reciclados substituem em parte os agregados convencionais (brita e areia) utilizados em concretos com ou sem função estrutural, sendo a segunda (sem função estrutural) normalizada pela NBR 15116. De acordo com Zordan (1997), o concreto

contendo agregado reciclado apresenta resistência a abrasão tem uma melhora de aproximadamente 26,5% em relação ao concreto convencional (de referência). Segundo o autor, os resultados obtidos nas pesquisas realizadas permitem concluir que o concreto fabricado de peças de concreto para a infra-estrutura urbana como elementos de drenagem, guias, sarjetas ou outras aplicações onde não se exijam resistências elevadas.

- Agregado alternativo para a argamassa: de acordo com Zordan (1997), pode-se utilizar esses agregados para a confecção de argamassas para assentamento e revestimento, porém a argamassa de revestimento normalmente apresenta fissuras possivelmente pela quantidade excessiva de finos presente no entulho. Essa forma de reciclagem é simples, sendo o agregado obtido através da moagem dos resíduos em um equipamento específico (argamasseira) na própria obra, evitando assim custos com transporte.

1.9 Características do Agregado do RCD

Sabe-se que por ser um material proveniente de construções, a composição do RCD pode variar significativamente a depender do tipo de obra, dos materiais empregados, bem como do valor financeiro da obra. Assim, faz-se necessária a análise de sua composição, para saber o tipo e a porcentagem de cada material que o compõe, com o intuito de avaliar de forma mais precisa, as análises futuras e seus resultados.

A Tabela 5 apresenta a composição de RCD encontrada por Santana (2014), Silva (2009) e Sinisterra (2014). Na mencionada tabela observa-se que embora exista uma lista relativa grande de materiais, a maior parte do RCD é composta por argamassa e concreto.

Tabela 5 - Comparativos - Composição do RCD

Material	Porcentagem de massa (%)		
	Santana (2014)	Silvia (2009)	Sinisterra (2014)
Argamassa/ Concreto	88,00	64,90	71,30
Rochas		23,60	25,88
Cerâmicos	11,00	10,70	2,81
Impurezas	1,00	1,20	0,01

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a NBR 15116 (2004), o agregado reciclado de RCD pode ser classificado em dois tipos: i) agregado de resíduo de concreto (ARC), assim denominado o material reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”; ii) agregado de resíduo misto (ARM). Este último também é obtido do beneficiamento de resíduo classe A, mas, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”.

1.10 Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)

Este item foi incluído nesta pesquisa em virtude de se colocar, como um dos objetivos, o aproveitamento do agregado reciclado de RCD também numa camada de revestimento asfáltico, como parte da estrutura de um pavimento. A justificativa para isso é que esta pesquisa é a continuidade de um projeto em desenvolvimento no GeoPav, iniciada com a dissertação de Santana (2014), Lourenço (2015) e Oliveira (2017).

O Concreto Asfáltico Usinado a Quente é uma mistura asfáltica constituída por agregados minerais (graúdo e miúdo) e o cimento asfáltico de Petróleo (CAP), comumente denominado asfalto. O CAP é um material de cimentante, com cores variando de castanho escuro a preto, em que os constituintes predominantes são betumes que ocorrem na natureza, ou são obtidos no processamento de petróleo. O asfalto é um constituinte em proporções variáveis de petróleo cru e utilizado para a pavimentação, coberturas, industrial e outros fins especiais (Asphalt Institute, 2015).

A preparação dessa mistura pode ser a quente, com o uso de CAP aquecido, geralmente a temperaturas acima de 100°C, ou a frio com o uso de algum agente dispersor,

como as emulsões asfálticas, EAP (emulsão asfáltica de petróleo), sendo também separadas em função da distribuição granulométrica: densas, abertas, contínuas e descontínuas. No Brasil a mistura mais utilizada é o concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), proporcionada de agregados de vários tamanhos (graduação densa) e cimento asfáltico, ambos aquecidos em temperaturas previamente escolhidas, em função da característica viscosidade-temperatura do ligante (Bernucci *et al.*, 2008). Geralmente os agregados utilizados na preparação das misturas tipo CAUQ são de origem natural, britados. Mas, já se sabe que é possível se utilizar agregados reciclados, com desempenho análogo ao das britas naturais. Nesta pesquisa serão utilizados agregados reciclados na preparação de uma mistura tipo CAUQ, cujo desenvolvimento se deu em paralelo com a pesquisa de trabalho de conclusão de curso da discente Oliveira (2017). Especificamente nesta pesquisa de iniciação científica foram avaliadas a deformação permanente e a resistência à tração no ensaio *Lotmann*.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o aproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no comportamento de um solo expansivo oriundo do município de Nossa Senhora do Socorro, Sergipe, e numa mistura de CAUQ, como base em ensaios de laboratório.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades geotécnicas do RCD utilizado na pesquisa, através de ensaios físicos e mecânicos;
- Análise da combinação do solo com RCD, na busca de melhoria nas propriedades físicas e mecânicas do solo, especialmente a redução da expansão;
- Comparar resultados obtidos das misturas solo-resíduo, em diferentes teores, com os parâmetros geotécnicos obtidos do solo puro;
- Apresentar, se possível, a porcentagem de RCD adicionada ao solo que foi mais eficiente, ou seja, a que resultou na menor expansão.

- Avaliar como o RCD interfere na deformação permanente de uma mistura asfáltica do tipo CAUQ.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

Para realizar os ensaios em laboratório, foram coletadas amostras de um solo argiloso fino, de tonalidade cinza, comumente denominado massapê, de caráter expansivo (Fig. 6). A coleta de amostras no campo teve o apoio de pessoal cedido pela empresa Sonda Engenharia e Construções LTDA. Por ocasião das atividades de campo, o período estava chuvoso, o que facilitou a escavação, e, logo em seguida o material foi colocado em sacos de nylon e transportado para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV) da UFS, onde foi espalhado em bandejas para secagem ao ar livre (Fig. 7), antes de se proceder o destorroamento e o quarteamento, tudo em área coberta.

Figura 6 - Escavação do solo argiloso.



Fonte: Moraes, 2017

Figura 7 - Solo argiloso nas bandejas para secagem.



Fonte: Moraes, 2017

3.1.2 Resíduo de construção de demolição

O resíduo reciclado utilizado nessa pesquisa foi cedido ao GEOPAV pela empresa Torre Empreendimentos Rural e Construção Ltda., a mesma responsável pela reciclagem de RCD. A unidade recicladora está localizada na BR 101, à altura do km 87,5 - Povoado Tabocas, no município de Nossa Senhora do Socorro. Após a chegada de aproximadamente 200kg de amostras de britas fina e média no laboratório, esses materiais foram colocados em bandejas para que ocorresse a secagem ao ar livre, e, assim, proceder-se em seguida as misturas de diferentes granulometrias de RCD.

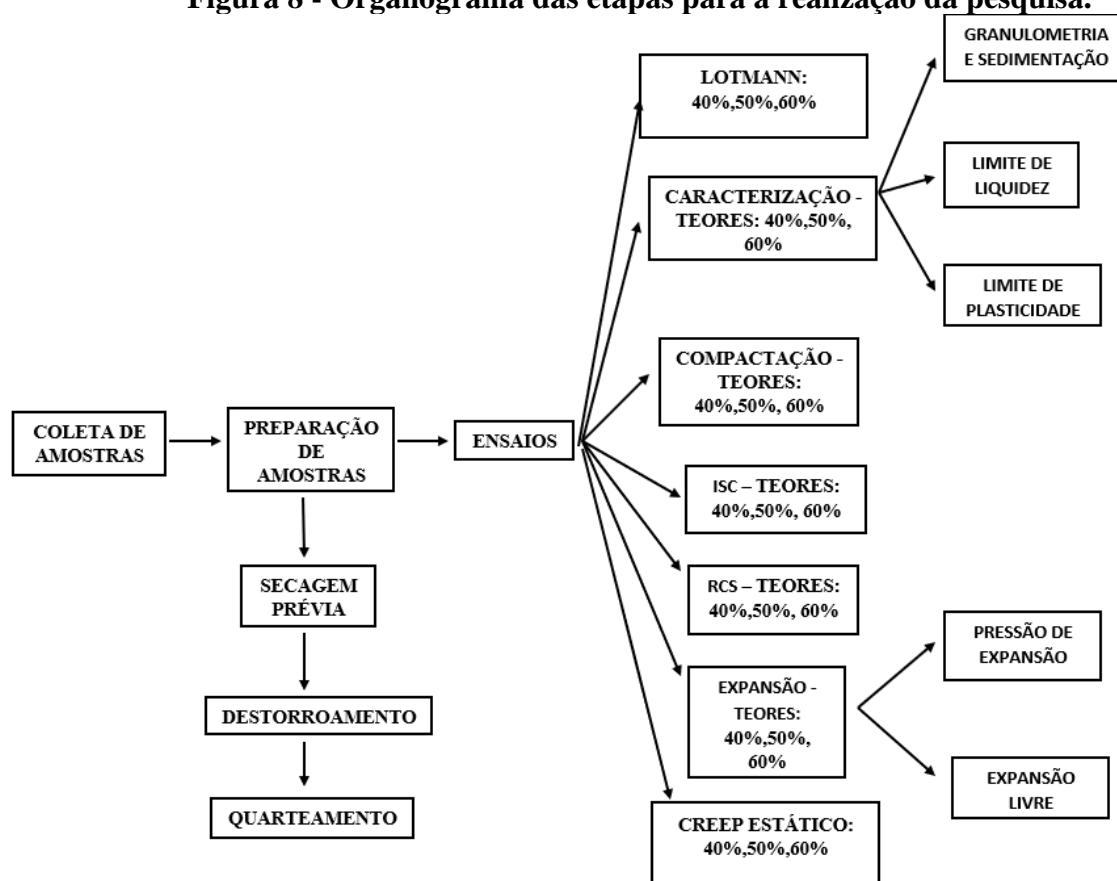
Cabe mencionar que o processo de reciclagem começa com a chegada do material na unidade recicladora, seguido da pesagem e o descarrego. Após isso, é feita uma triagem manualmente para selecionar os enquadrados nas classes B, C e D, da resolução CONAMA 307/2002. Nessa etapa o material é conduzido para os britadores, onde é triturado até se

obter a granulometria desejada. Enfim, o material passa por um separador magnético, para que os metais que não foram retirados da triagem sejam identificados, como ferragens presentes nas peças de concreto armado e descartados (LOURENÇO, 2015).

3.2 Métodos

A pesquisa foi realizada procurando-se seguir as diretrizes metodológicas postas no organograma apresentado na Figura 8. Os ensaios foram realizados primeiramente com o solo puro, e em seguida com a mistura de RCD com diferentes teores. Após as misturas, as amostras de cada ensaio foram repartidas e armazenadas em sacos plásticos para facilitar a realização dos ensaios, como apresentado na Figura 9.

Figura 8 - Organograma das etapas para a realização da pesquisa.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 9 - Amostras das misturas de RCD com o solo.



Fonte: Autor, 2017.

Os ensaios foram realizados de forma duplicada, para melhor comparação e segurança dos mesmos. Quando um resultado de um ensaio realizado com a réplica diverge do resultado do primeiro ensaio, uma terceira réplica é ensaiada para que se decida sobre o valor mais provável do parâmetro medido. Se o terceiro divergir dos demais, um quarto ensaio é realizado, e assim sucessivamente, até que se tenha maior precisão e acurácia dos valores obtidos.

3.2.1 Mistura do solo com o RCD

Para determinar a quantidade de solo e do RCD a ser colocado em cada mistura, foram utilizadas as massas secas do solo puro da amostra, bem como do RCD. Foram calculadas e desprezadas as massas de água presente nas amostras devido à umidade higroscópica. A partir dessa massa seca foram atribuídos os teores de – 40%, 50% e 60%. Para a realização da mistura foram utilizados os repartidores, uma vez que o uso de

bandejas e colheres de pedreiro não teriam uma boa utilização, pois a amostra era relativamente grande.

3.2.2 Ensaios de Caracterização

Para a caracterização do solo e da amostra de RCD, foram realizados ensaios rotineiros de Análise Granulométrica, Limites de Atterberg e Densidade Real. Todos foram executados de acordo com os procedimentos da norma NBR 6457:1986, tanto na fase de preparação dos ensaios de compactação, quanto na execução dos ensaios de caracterização.

3.2.2.1 Análise Granulométrica

Esse ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da norma NBR 7186 (2016), a que estabelece o método feito por peneiramento (ver Fig. 10) e por sedimentação, utilizando o defloculante hexametáfostato de sódio (ver Fig. 11). A finalidade da análise granulométrica é obter o quantitativo da distribuição por tamanhos das partículas presentes no solo, expressa como porcentagem em relação à massa seca total.

Figura 10 - Peneiramento



Figura 11 - Sedimentação



Fonte: Autor, 2017.

3.2.2.2 Densidade Real

Esse ensaio refere-se à relação entre massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas. Para a sua determinação foi-se utilizado o método do picnômetro, de acordo com a norma DNER-ME 093/94, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de Massa específica Real.



Fonte: Autor, 2017.

3.2.2.3 Limites de Atterberg

- Limite de Liquidez

O limite de liquidez é referente à umidade com a qual se unem, em 13mm de comprimento, dos bordos inferiores de uma ranhura. Ele é feito com uma amostra de solo no aparelho de Casa Grande, sob a ação de 25 golpes e com a altura de queda de 1cm. A sua finalidade é definir o teor de umidade correspondente à passagem do estado líquido para o estado plástico. A execução do ensaio com a norma NBR 6459 (1984).

- Limite de Plasticidade

Esse ensaio foi realizado com a norma NBR 7180 (1984). O limite de plasticidade é referente à transição do solo do estado plástico para o estado semi-sólido. Para a realização desse experimento, utiliza-se 50g de material, onde em uma cápsula de porcelana se adiciona água lentamente, até criar uma massa plástica que seja capaz de se formar uma bola. Então, é separada uma quantidade que sofrerá uma pequena pressão com a palma da mão rolando sobre uma placa de vidro esmerilhada, com a finalidade de formar um cilindro de 3mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Após o aparecimento de fissuras, o cilindro é partido em partes e transferido para cápsulas, para a obtenção de umidade. O ideal é que se façam cinco pontos.

3.2.3 Ensaio de Compactação

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 7182 (1986). Foi utilizado o cilindro grande, estabelecido por Proctor, e a energia de Proctor Intermediário, com reuso de material, a execução do ensaio é ilustrado na Figura. O ensaio tem por objetivo a determinação do peso específico seco aparente máximo (γ_d) e o seu correspondente teor de umidade, denominado teor ótimo ($w_{ót}$), para utilizar esses valores na moldagem dos corpos de prova visando os ensaios subsequentes. Do ponto de vista prático, a finalidade de compactação de um solo é diminuir os vazios e elevar o seu peso específico, o que resulta em aumento de resistência e manutenção das suas propriedades, ou seja, deixando-o mais estável, conforme apontado por Caputo (1988). As Figuras 13 e 14 ilustram os equipamentos empregados no ensaio de compactação de solos.

Figura 13 - Ensaio de Compactação



Figura 14 - Ensaio de compactação



Fonte: Autor, 2018

3.2.4 Ensaios do CBUQ

3.2.4.1 Ensaio de deformação permanente

3.2.4.1.1 Creep estático

O ensaio de creep estático é o procedimento mais simples para se avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas. O método consiste na aplicação de uma carga de compressão estática e contínua ao longo do tempo, no plano axial de um corpo-de-prova padrão de CAUQ, geralmente de forma cilíndrico regular.

O tempo de aplicação da carga pode variar, embora ainda não haja um consenso sobre este aspecto. De qualquer, a prática atual revela uma tendência de que o tempo de atuação da carga ou tensão seja igual a 1 hora (Shell, 2003). Durante esse período, são feitas medidas do deslocamento axial sofrido pela amostra devido ao carregamento estático.

O corpo de prova se deforma até que ocorra a estabilização do deslocamento vertical ou até a ruptura, havendo alguns critérios, como por exemplo, se a deformação

relativa for da ordem de 0,008mm/mm ao final de 1 hora. Neste caso, indica-se que a mistura asfáltica não estaria adequada para resistir às ações permanentes.

3.3.4.1.2. Lottman modificado

O procedimento original para a determinação da resistência de misturas asfálticas por dano provocado por umidade foi desenvolvido por Lottman, no final da década de 1970 (LOTTMAN, 1978). Esse procedimento incluiu uma saturação sob vácuo por 30 minutos, seguido de 30 minutos sob pressão atmosférica. As amostras foram congeladas a uma temperatura de -18°C por 15 horas, seguidas por 24 horas em banho-maria, com água na temperatura igual a 60°C .

Depois de realizar o ciclo de congelamento e descongelamento as temperaturas dos corpos de prova foram estabilizadas a 25°C por 2 horas e submetidos aos ensaios de tração por compressão diametral na velocidade de 5,08 mm/min. A Figura 15 mostra o procedimento de saturação em vácuo.

Figura 15 - Corpo de Prova em pressão atmosférica.



Fonte: Autor, 2017.

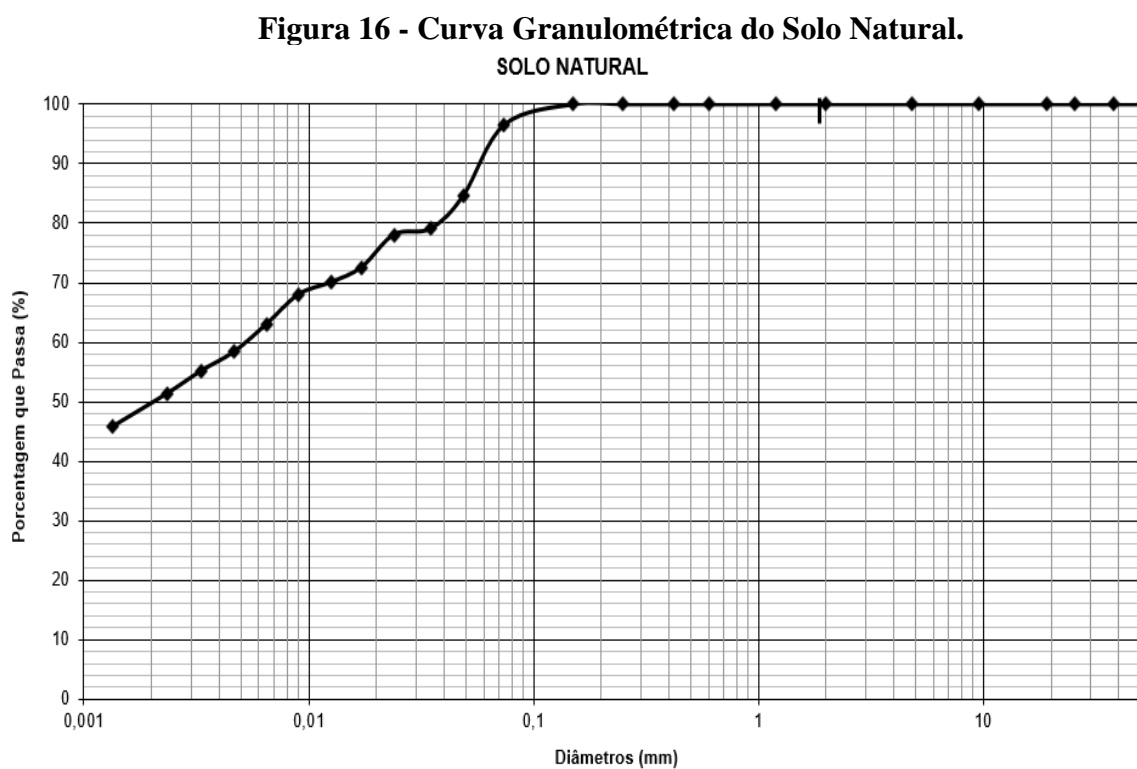
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão analisados e apresentados em função dos ensaios realizados em laboratório com o RCD puro e com as respectivas misturas solo-resíduo.

4.1 Caracterização geotécnica do Solo Puro

Os ensaios de caracterização do solo puro são referentes ao Trabalho de Conclusão de Curso de Moraes, 2018. Assim, todos os resultados desse material são retirados do seu estudo.

A análise granulométrica feita por peneiramento e sedimentação apresenta uma predominância de material fino (silte e argila), que corresponde cerca de 96,18% do solo natural, isto é a fração passante na peneira de nº 200. A Figura 16 apresenta a curva granulométrica, enquanto que a Tabela 6, apresenta o resumo das frações de pedregulho, areia, silte e argila (Moraes, 2018).



Fonte: Moraes, 2018

Tabela 6 - Resumo Granulométrico – Solo Natural.

Fração	Solo Natural
Pedregulho (%)	0,00
Areia (%)	3,83
Silte (%)	35,99
Argila (%)	60,19

Fonte: Moraes, 2018

Na Tabela 7, pode-se ver os valores do γ_s , LL, LP, IP, classe e IG os quais também foram classificados de acordo com a SUCS e AASHTO.

Tabela 7 - Caracterização e Classificação geotécnica do solo natural.

Material	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classe/IG
Solo Natural	2,643	72	33	39	A-7-5 (20)

Legenda: γ_s → massa específica dos grãos.

IP → índice de plasticidade; IG → Índice de grupo.

Fonte: Elaborado pelo autor

Os limites de liquidez e plasticidade do solo foram 72% e 33%, respectivamente, resultando no índice de plasticidade (IP) igual a 39%, que de acordo com SUCS é um material de alta plasticidade. (Moraes, 2018).

Segundo a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), o material apresenta índice de grupo (IG) igual a 20 e pertence ao grupo A-7-5, como o solo é predominantemente argiloso, devido a alta porcentagem de material que passa na peneira de n°200, IP superior a 30 e LL maior que 70. (Moraes, 2018).

A Figura 17 apresenta a curva de compactação do solo natural. É perceptível o formato de sino, uma vez que está presente na maioria dos solos argiloso (DAS, 2017). Nessa Figura pode ser determinado os valores de $\gamma_{máx} = 16,27$ kN/m³ e $W_{ótima} = 20,7\%$. (Moraes, 2018).

Figura 17 - Curva de Compactação do Solo Natural.



Fonte: Moraes, 2018

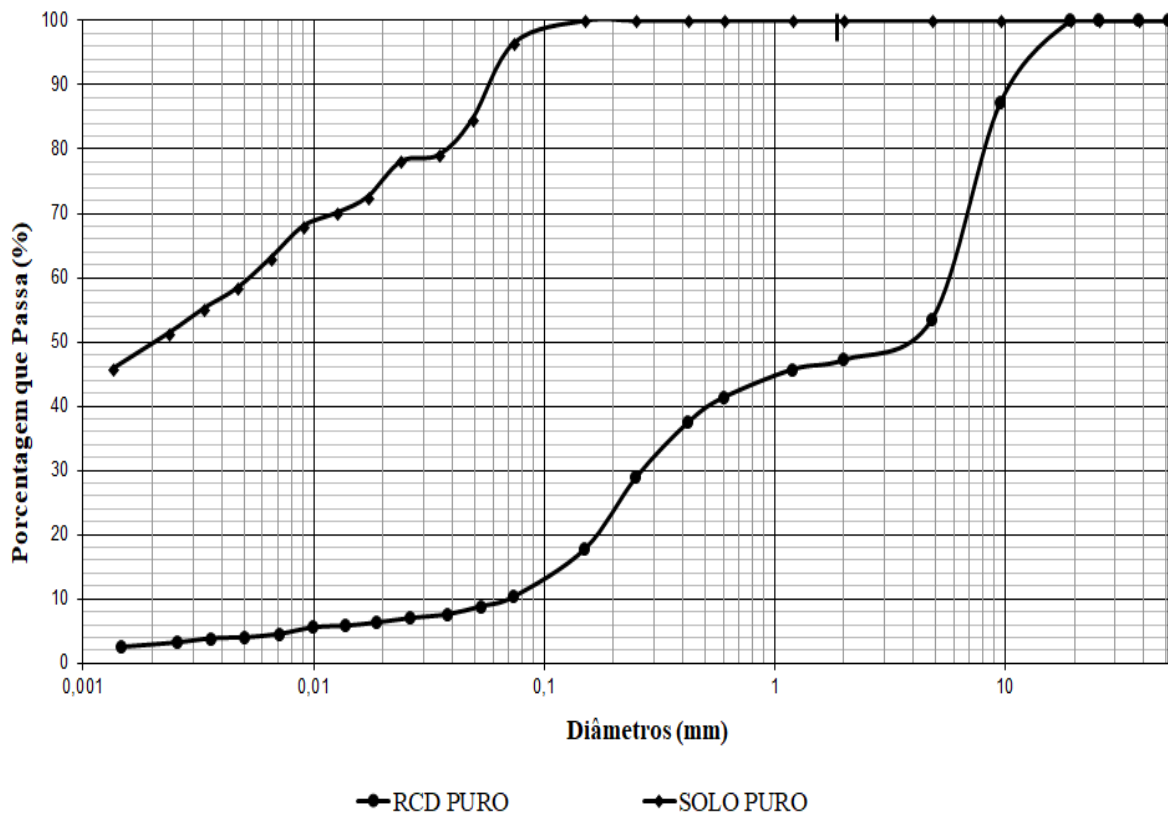
Em relação à capacidade de suporte, o solo puro apresentou um valor muito baixo de ISC, em torno de 2 %, com expansão muito elevada para um solo compactado, da ordem de 9%, conforme resultados obtidos por Moraes (2018), que desenvolveu a sua pesquisa conjuntamente a esta.

Com os ensaios de compressão simples foi obtido o valor da tensão de ruptura igual a 523,6 kPa (0,52 MPa), o que corresponde a um valor de coesão igual a 0,26 MPa, sem cura, ao passo que aproximadamente 1,3 MPa para o valor da resistência à compressão simples com cura de 7 dias. Pode-se perceber que o solo, ao passar pelo processo de cura (descanso em câmara úmida), houve aumento de 382% da sua resistência (Moraes, 2018).

4.2. Caracterização geotécnicas do RCD puro

Na Figura 18 observa-se a curva granulométrica do resíduo puro, enquanto que na Tabela 8 tem-se as frações granulométricas de pedregulho, areia, silte e argila de RCD.

Figura 18 - Curva granulométrica do RCD.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Frações granulométricas do RCD.

Fração	RCD
Pedregulho (%)	52,78
Areia (%)	36,86
Silte (%)	6,40
Argila (%)	3,96

Fonte: Elaborado pelo autor

Do gráfico mostrado na Figura 18 e da Tabela 8 percebe-se que o RCD empregado nesta pesquisa é composto por uma expressiva fração de pedregulho, que somada ao percentual de areia, corresponde a aproximadamente 90% do material, o que caracteriza a natureza granular do RCD.

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos dos ensaios de massa específica real e Limites de Atterberg.

Tabela 9 - Caracterização e Classificação geotécnica do RCD.

Material	γ_s (g/cm³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classe/IG
RCD	2,643	NP	NP	NP	A-1-b (0)

Legenda: γ_s → massa específica dos grãos.

IP → índice de plasticidade; IG → Índice de grupo.

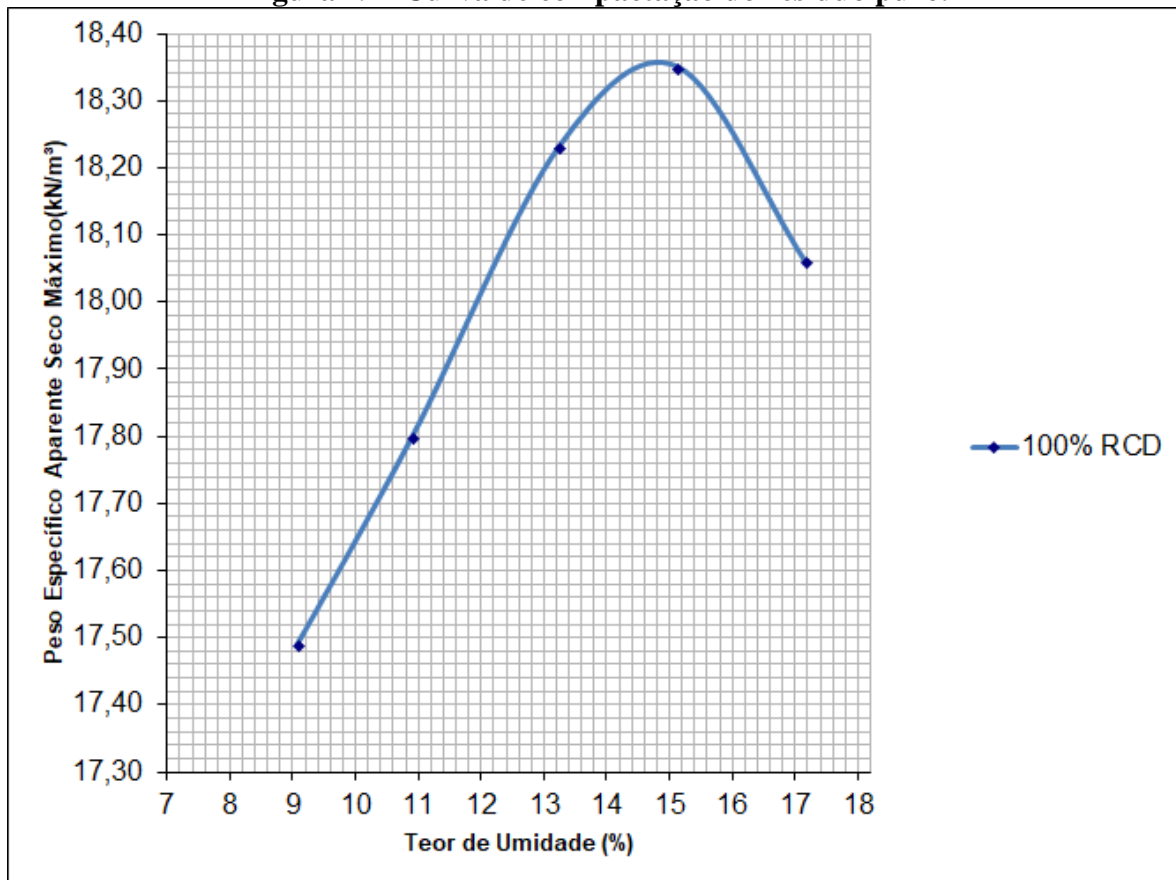
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os dados da Tabela 9, o RCD empregado nesta pesquisa apresenta características granulométricas de um material de granulometria média, sendo classificado como A-1-b. De acordo com a norma DNIT 719/2006, os materiais pertencentes a esse subgrupo são compostos por areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado. Vale lembrar também que o sistema TRB leva em consideração apenas critérios físicos, e que o material não se trata de solo, mas sim de um resíduo sólido reciclado.

Como já era esperado, o material é classificado como Não Plástico, e tem IG igual a 0, com massa específica das partículas sólidas da ordem de 2,64 g/cm³.

De acordo com os dados extraídos da Figura 19, obteve-se 18,36 kN/m³ para o peso específico aparente seco máximo, enquanto o teor de umidade ótimo ficou na casa dos 14,8%. Comparando-se esses valores com os do solo natural, percebe-se que o RCD é 12% mais denso do que o solo e a umidade ótima é cerca de 40% menor, o que também seria esperado, por ser o RCD um material predominantemente granular. Isso se reflete nos ensaios de ISC realizados com os agregados reciclados de RCD, que atingiram um patamar de ISC igual a 100%, enquanto que a expansão foi quase nula (0,01%).

Figura 19 - Curva de compactação do resíduo puro.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com o DNIT 141/2010, ainda assim, o resíduo seria inadequado para uso como material de base estabilizada granulometricamente, pois embora o ISC seja superior a 60% e a expansão menor que 0,5%, o resíduo é um material não plástico. Mas, poderia ser utilizada como Brita Graduada ou Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).

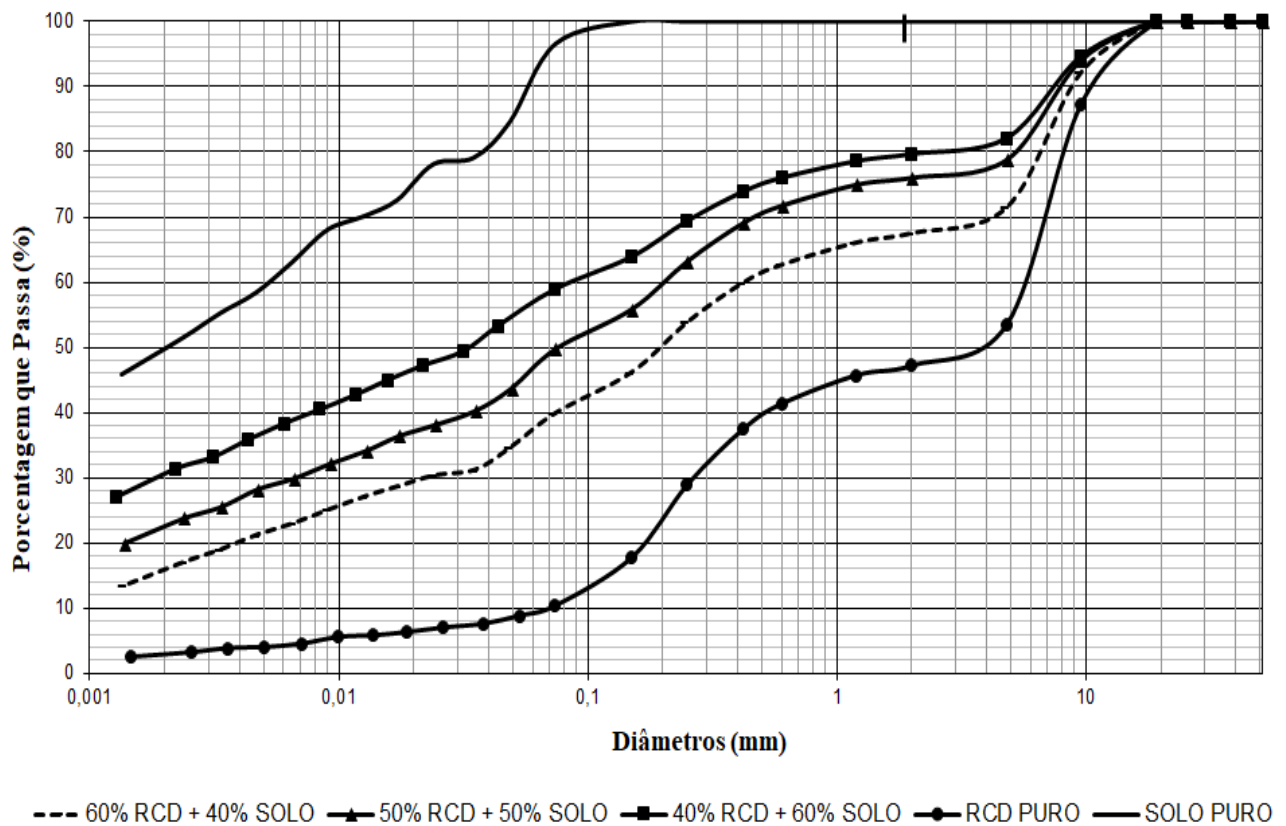
Para a resistência a compressão simples, que verifica a resistência do resíduo não confinado é de 80kPa, o qual foi realizado com um CP de diâmetro de 5cm e altura de 10cm.

4.3. Misturas Solo-RCD

4.3.1. Caracterização geotécnicas das misturas

Na Figura 20 são mostradas as curvas granulométricas obtidas com as misturas solo-RCD nas proporções de 40%, 50%, 60% e 100% do RCD usado nesta pesquisa.

Figura 20 - Curva granulométrica das misturas.

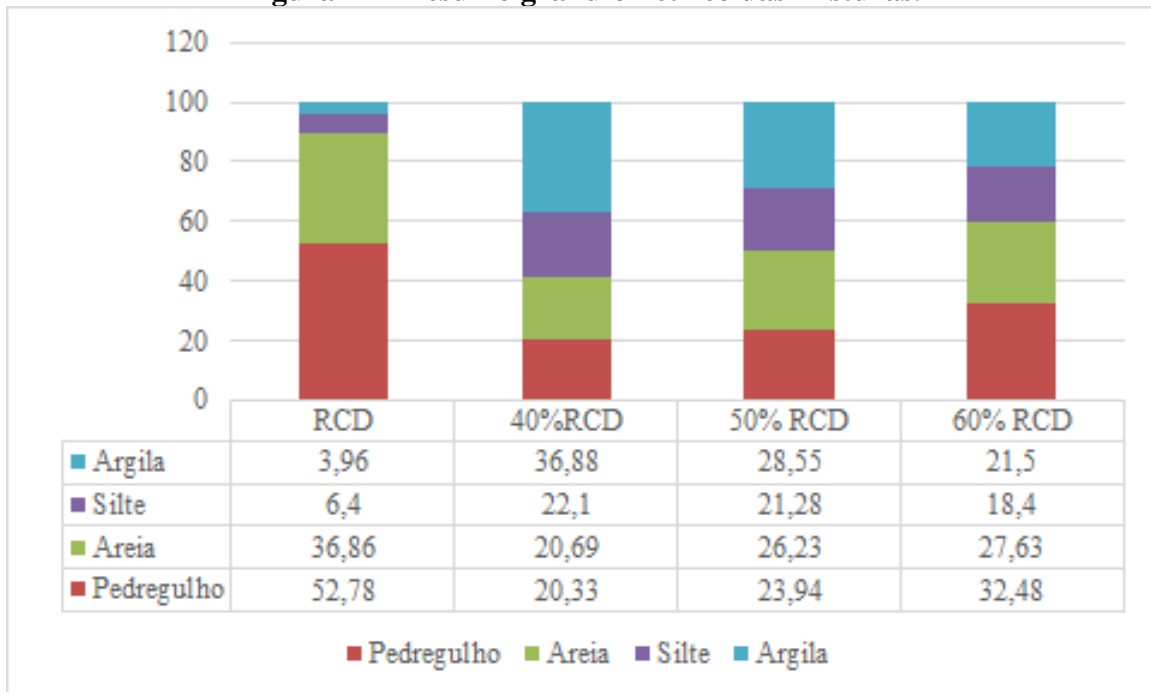


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber das curvas granulométricas mostradas na Figura zz que as misturas se tornam mais características de material granular à medida que o percentual de RCD é acrescido ao solo, como se poderia esperar. Este aspecto corrobora com resultados da pesquisa desenvolvida por Guedes e Júnior (2016), o qual utilizou misturas de agregado reciclado com uma areia argilosa, em que se constatou a diminuição gradativa do percentual de argila, em detrimento do aumento de grãos de areia e pedregulho, como resultado do aumento no percentual de resíduos de RCD na matriz de solo.

E de acordo com a NBR 6502 (1995), na Figura 21, podem ser observados os percentuais de pedregulho, areia grossa, média e fina, além da fração silte e argila.

Figura 21 - Resumo granulométrico das misturas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as Figuras 20 e 21 observou-se a porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente superior a 5% em massa, o diâmetro máximo. No solo puro o diâmetro máximo obtido foi 0,074 mm, já no agregado reciclado de RCD foi 19mm. A medida que a porcentagem de resíduo aumentava o diâmetro máximo continuou o mesmo nas misturas, 19 mm.

Com base na caracterização geotécnica, os materiais empregados nesta pesquisa podem ser classificados de acordo com o sistema de classificação TRB/AASHTO, conforme consta na Tabela 10.

Tabela 10 - Caracterização e classificação geotécnica das misturas.

Material	γ_s (g/cm³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classe/IG
Solo Natural	2,643	72	33	39	A-7-5 (20)
RCD	2,643	NP	NP	NP	A-1-b (0)
40% RCD	2,682	51	25	26	A-7-6 (12)
50% RCD	2,661	44	22	22	A-7-6 (7)
60% RCD	2,645	43	22	21	A-7-6 (4)

Legenda: γ_s → massa específica dos grãos.

IP → índice de plasticidade; IG → Índice de grupo.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da incorporação do RCD ao solo, observa-se que há uma alteração na classificação seguindo os procedimentos da TRB. Ou seja, a partir da adição dos agregados à matriz de solo, as misturas são classificadas como A-7-6, enquanto que o RCD é um material da classe A-1-b.

Para os valores de massa específica real (γ_s), como já era esperado, percebe-se que a medida que a porcentagem de resíduo aumenta, menor é o γ_s , pois as partículas são menos densas que o solo natural.

Em comparação ao solo puro, a mistura com 40% de resíduo experimentou uma redução de 33,33% no valor do IP, enquanto que as misturas com 50% e 60% de agregados reciclados de RCD sofreram redução de 43,59% e 46,15%, respectivamente, na plasticidade. Pode-se observar que há uma redução do IP à medida que o teor de RCD aumenta, porém, essa redução não é tão expressiva.

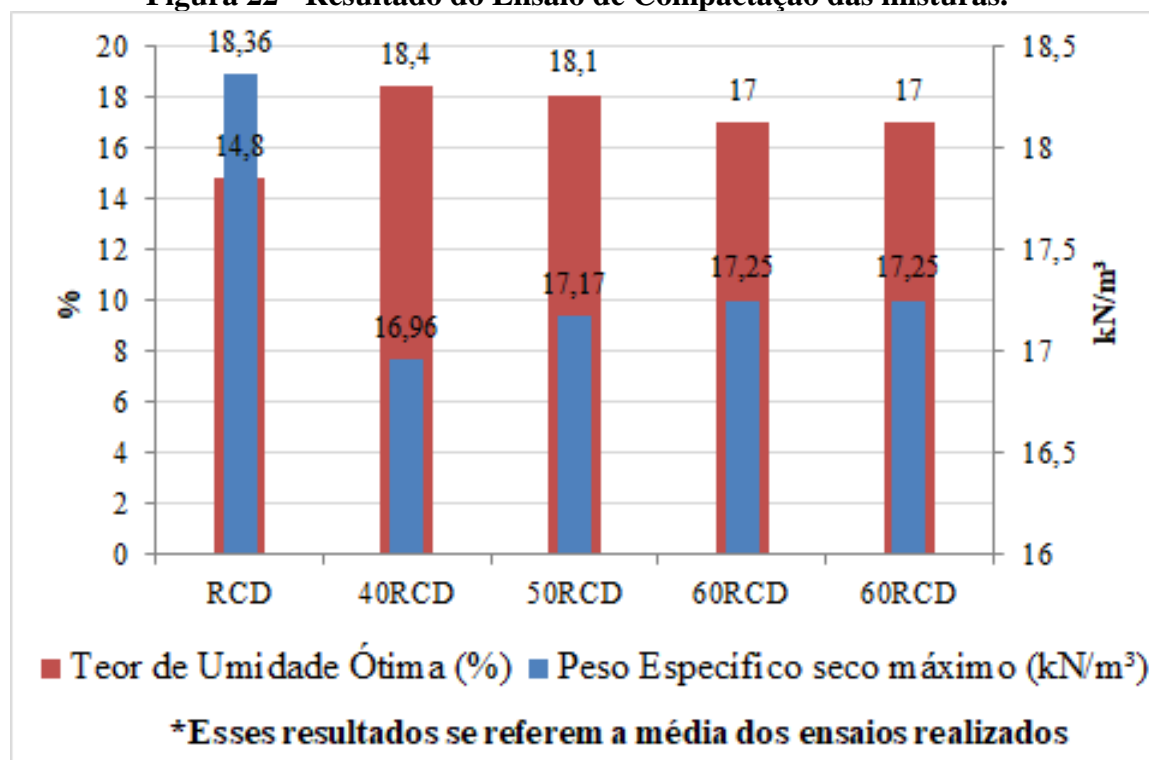
O índice de grupo que é empregado no sistema H.R.B. está relacionado a capacidade de suporte do solo que varia de 0 (ótima capacidade de suporte) a 20 (péssima capacidade de suporte). Assim, de acordo com a Tabela 10 o solo natural tem IG igual a 20, porém quando esse é acrescido de 40% de RCD o valor decai para 12, para 50% decai para 7 e 60% para 4. Vale lembrar que o RCD, por si só, já possui capacidade de suporte expressiva, o que faz com que os valores de IG diminuam à medida que aumenta a porcentagem de RCD na mistura.

4.4 Compactação

Os resultados obtidos dos ensaios de compactação (Proctor intermediário) estão apresentados na Figura 22. Conforme se pode observar nos dados mostrados na referida figura, constata-se que pelo fato do RCD ser um material granular, desprovido de plasticidade, quando este é adicionado ao solo ocorre uma redução no teor de umidade ótima, da ordem de 18%, em comparação ao solo puro, mas, ainda assim, considerada uma redução não tão acentuada, como se poderia esperar.

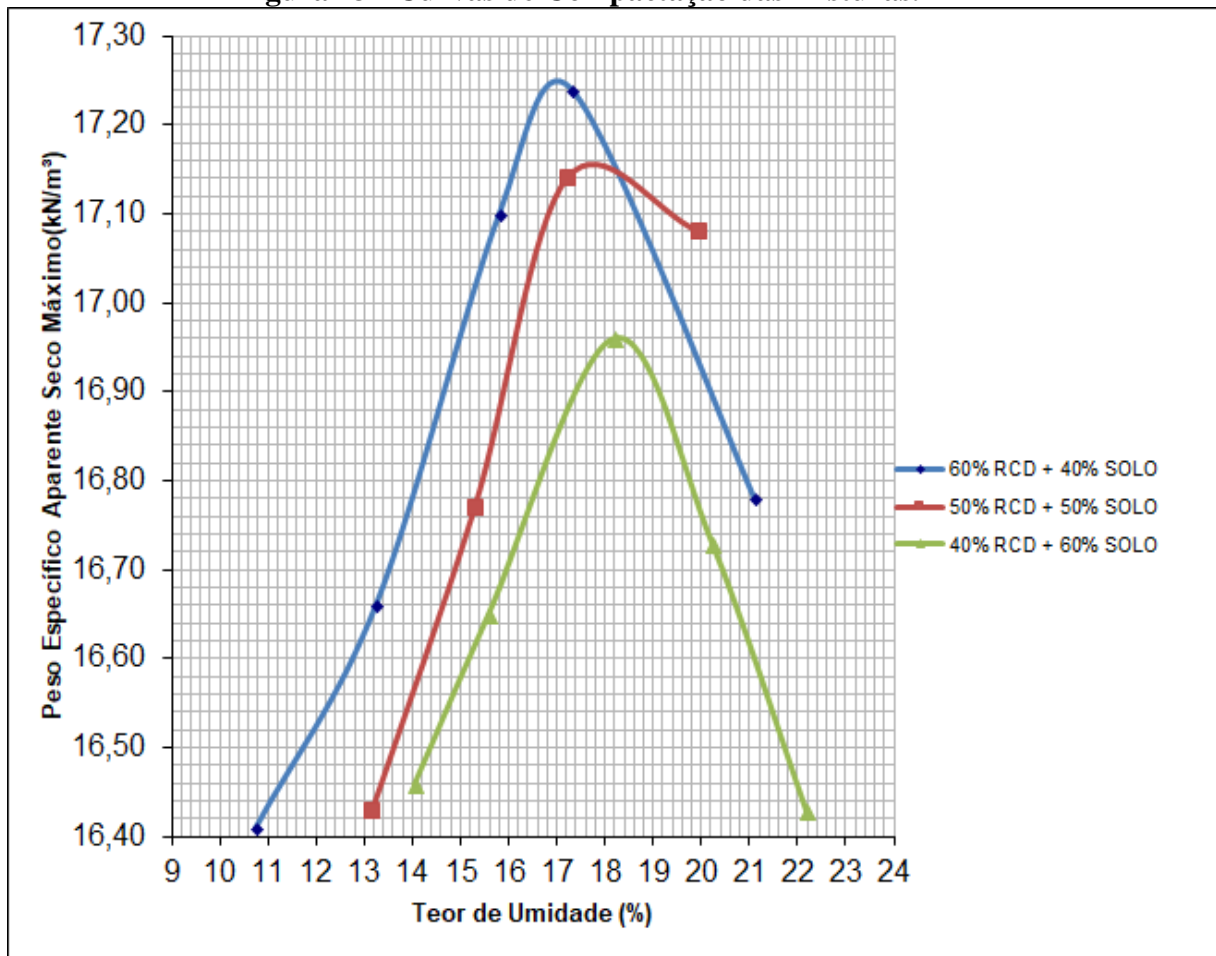
De forma análoga, com o aumento do percentual de RCD no solo, há o crescimento no valor do peso específico aparente seco máximo. Mas, a exemplo do teor de umidade, de maneira relativamente discreto, se elevando de $16,27 \text{ kN/m}^3$, com o solo puro, para apenas $17,25 \text{ kN/m}^3$, quando se adicionou 60% de agregado reciclado, um aumento de apenas 6%. Isso certamente terá reflexos nas propriedades mecânicas das misturas. Na Figura 22 e 23 são apresentadas as curvas de compactação das misturas.

Figura 22 - Resultado do Ensaio de Compactação das misturas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 - Curvas de Compactação das misturas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Índice de Suporte Califórnia

Na Tabela 11 são mostrados os valores obtidos dos ensaios de ISC e expansão, realizados com os materiais puros e com as misturas.

De acordo com a norma DNIT 141/2010, o valor do ISC especificado para as bases estabilizadas granulometricamente varia de 60% a 80%, dependendo do volume de tráfego, representado número N de passagens do eixo padrão, com expansão igual ou menor que 0,5%. Para a sub-base, de acordo com a norma DNIT 139/2010, o ISC deve ser igual ou maior a 20%, e expansão máxima igual a 1%.

Tabela 11 - Resultados do Ensaio de ISC e expansão do solo, RCD e misturas.

Índices	RCD	Solo natural	40% RCD	50% RCD	60% RCD
ISC (%)	100	2	2	3	5
Expansão (%)	0,01	9,12	6,13	4,68	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da Tabela 11 se observa que o RCD causa pouca influência na capacidade de suporte do solo, provavelmente pelo fato de se tratar de um solo que apresenta nas condições naturais, e até mesmo compactado, com elevada expansão. Neste caso, conforme já comentado, RCD assume um papel de quase total passividade, e, portanto, torna-se inadequado para a estabilização do solo em estudo. Ou seja, enquanto o solo puro apresentou um baixíssimo valor de ISC (2%) e elevadíssima expansão (em torno de 9%), por se tratar de solo massapê, com a adição do agregado reciclado o ISC cresce para apenas 5%, mais ainda com uma expansão superior a 2%.

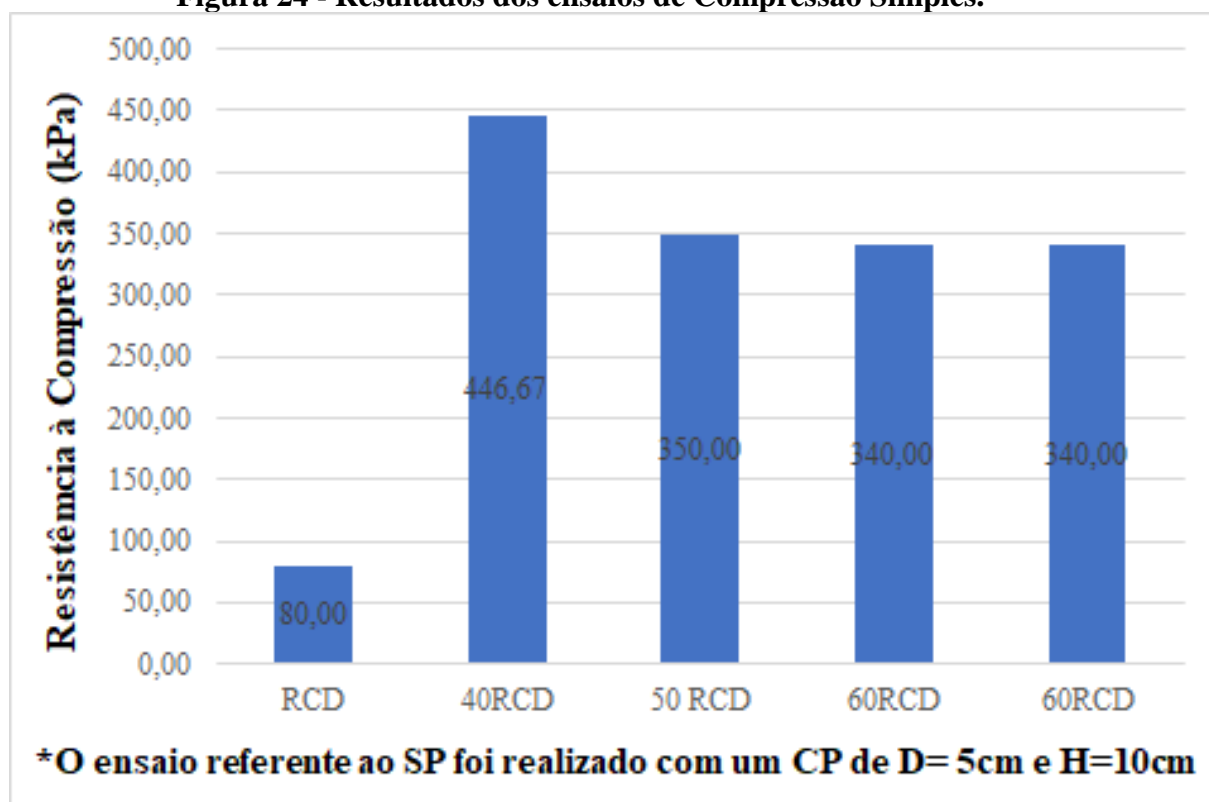
Observa-se com os dados das misturas que à medida que se adiciona agregados reciclados ao solo expansivo, os valores de ISC tendem a aumentar. Porém, diferente do que acontece com os solos não expansivos, o aumento se dá de maneira muito discreta, passando de 2% com o solo puro, para um máximo de 5%, com a adição de 60% de RCD. É interessante destacar que o ISC não se alterou quando o solo foi substituído por 40% de agregados de RCD. A expansão do solo puro, que é cerca de 9%, experimenta uma tendência de redução quando ao solo é incorporado o resíduo, caindo ao menor patamar, 2,4%, quando se usou 60% de agregado reciclado de RCD.

Diante desses dados de ISC e expansão das misturas, em comparação ao solo puro, conclui-se que a inclusão do RCD ao solo expansivo não agrega melhorias substanciais em seu comportamento, em termos de capacidade de suporte do solo, levando-se a crer que o processo de estabilização granulométrica não é indicado para combater os efeitos decorrentes da expansão de solos de massapê.

4.6 Resistência à Compressão Simples

A Figura 24 apresenta graficamente os resultados obtidos dos ensaios de compressão não confinada, realizados com os materiais usados nesta pesquisa. Conforme se pode observar no gráfico, por se tratar de material coesivo, o solo expansivo possui valor de RCS muito maior (cerca de 0,5 MPa), do que o agregado de RCD, que atinge a marca de apenas 80 kPa, decorrente dos finos presentes nos agregados. Ainda assim, o máximo valor de RCS obtido corresponde a apenas cerca de ¼ do valor mínimo (2,1 MPa) indicado para utilização em camadas granulares de pavimentos, conforme consta nas especificações rodoviárias (Bernucci *et al.*, 2008). Esse comportamento era esperado, uma vez que a classificação geotécnica realizada o enquadra na classe das areias grossas, não apresentando fração cimentante ou coesiva significativa.

Figura 24 - Resultados dos ensaios de Compressão Simples.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando-se os valores obtidos para as misturas, constata-se a redução nos valores da RCS do decorrente da adição dos agregados de RCD na matriz do solo, que tem

sua resistência à compressão reduzida em cerca de 35% quando se adiciona entre 50% e 60% de agregados de RCD ao solo, como se poderia esperar, uma vez que material granular quando adicionado a solos argilosos tendem a reduzir a parcela de resistência coesiva.

Vale ressaltar também que os coeficientes de variação foram relativamente baixos, ficando na faixa de 1,45% a 6,42%.

Dos resultados obtidos nesta pesquisa e das análises efetuadas, conclui-se que a incorporação dos agregados do RCD ao solo expansivo não contribuiu para um ganho de resistência do solo nem para promover a redução expressiva da expansão característica desse tipo de material expansivo, de forma que as misturas solo-RCD possam ser utilizadas como material para a construção de camadas de pavimentos rodoviários. Esta conclusão serve para reforçar as evidências de que apenas o tratamento químico é capaz de inibir o fenômeno da expansão nesse tipo de solo, o que fica como sugestão para continuidade dessa parte da pesquisa.

4.7 Ensaio *Lottman* Modificado

Esse tipo de ensaio aplicado às misturas asfálticas é utilizado para determinar a perda por umidade induzida, e, conforme já mencionado, foi desenvolvido nesta pesquisa juntamente com o trabalho de final de curso de Oliveira (2017). O objetivo do ensaio é se avaliar a resistência à tração da mistura após vários ciclos de aquecimento e congelamento da mistura, simulando variações extremas de temperatura, denominados ciclos de condicionamento.

De acordo com o critério de resistência retida à tração (RRT), estabelecida pela versão T283 (AASHTO, 1999) ajustada para o método de dosagem SUPERPAVE, o critério de aceitabilidade da mistura com base no valor da RRT, a relação entre a resistência à tração da mistura depois (RTu) e antes do condicionamento (RT) deve ser no mínimo de 80%.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da resistência à tração por compressão diametral da amostra de resíduo com a mistura asfáltica (sem e com condicionamento), bem como os valores da resistência retida à tração.

Tabela 12 - Resultado do ensaio de Lottman Modificado.

Material	CPs Não Condicionados (RT)			CPs Condicionados (RTu)			RRT (%)
	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)	Média (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)	
RCD	0,98	0,01	1,10	0,90	0,13	14,07	91,15

Fonte: Oliveira, 2017.

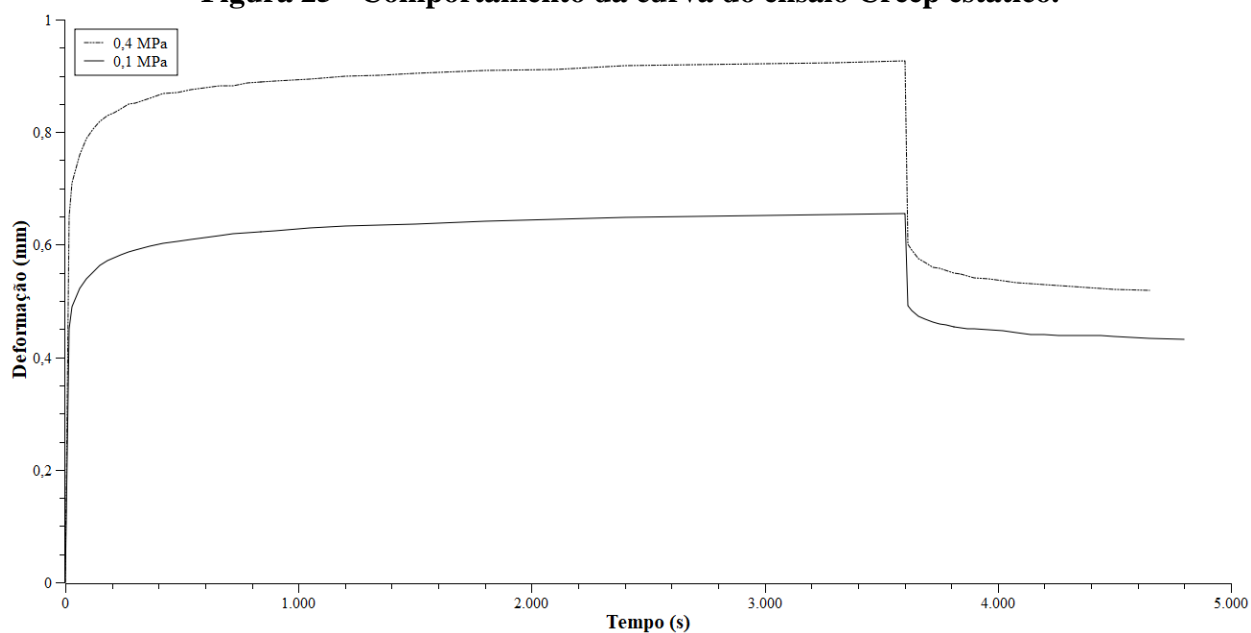
Observando-se os dados da tabela, verifica-se que a RRT foi da ordem de 91 %, valor que supera o mínimo especificado, que seria 80%, do que se pode concluir que a mistura asfáltica testada com agregados de RCD se apresentou adequada.

É importante considerar também que de acordo com outros trabalhos abordando essa temática, realizados com RCD resultaram em valores levemente menores de RRT, como por exemplo, Sinisterra (2014), que obteve RRT da ordem de 86%. Isso se deve ao fato de que o resíduo reage normalmente à expansão devido a água após o processo de congelamento.

4.8 Ensaio de *Creep* estático

Na Figura 25 são apresentados os gráficos de deformação permanente obtidos dos ensaios realizados na prensa de adensamento do GeoPav, em que a amostra foi submetida a um carregamento e descarregamento de carga 0,1 MPa e 0,4 MPa para a mistura confeccionada com o agregado reciclado de resíduo de construção e demolição. A partir da figura e dos gráficos mostrados que no início do carregamento há um acentuado crescimento da deformação, que se mantém praticamente constante ao longo do tempo. Observa-se ainda que quanto maior a tensão estática, maior a deformação permanente medida, o que já era esperado, pois quanto maior a carga, maior a deformação numa camada de pavimento flexível. A análise dos gráficos permite concluir que apesar de se obter uma maior deformação permanente sob o carregamento de 0,4 MPa, recuperação elástica foi melhor, tendo sido da ordem de 35%, enquanto para a carga de 0,1 MPa foi 33%, aproximadamente.

Figura 25 - Comportamento da curva do ensaio Creep estático.



Fonte: Elaborado pelo autor

Estudos correlatos, como por exemplo, o realizado por Yan (2013), tem mostrado valores de deformação permanente inferiores aos obtidos no presente trabalho. Todavia, há que se levar em conta outros aspectos, a exemplo a faixa granulométrica escolhida, se mais aberta ou mais densa, temperatura da mistura, entre outras variáveis que influenciam no comportamento de deformabilidade das misturas asfálticas. Devido a isso poderia ser menos deformável que o de (Yan, 2013), que adotou uma temperatura de 40° C, pois se sabe que a temperatura está relacionada com a rigidez do ligante.

5. CONCLUSÕES

Foi feita uma tentativa de estabilização granulométrica de um solo expansivo encontrado na zona de expansão norte da área metropolitana de Aracaju. Para tal, foi feita uma campanha de ensaios de laboratório com uma amostra de solo expansivo, as amostras do resíduo utilizado para a tentativa de estabilização e das respectivas misturas. Os ensaios físicos e mecânicos realizados com o RCD permitiram classificar o material como NP (não plástico) e elevada capacidade de suporte (ISC igual a 100%). Adicionando-se ao solo expansivo os agregados reciclados médios e finos de RCD nos percentuais de 40%, 50% e 60%, em massa, em substituição à correspondente massa de solo, foram obtidos e analisados os resultados dos ensaios geotécnicos de caracterização, compactação, ISC e RCS. Os resultados obtidos com as misturas de solo-RCD, especialmente em termos de capacidade de suporte (ISC) e resistência à compressão não confinada, permitem concluir que embora o agregado reciclado tenha reduzido a expansão do solo compactado em cerca de 74%, os valores finais da expansão ainda se mantiveram relativamente elevados para que o material pudesse ser indicado ao uso ao qual se pretendia, ou seja, camadas estruturais de pavimentos, do tipo solo estabilizado granulometricamente. Do ponto de vista da resistência, concluiu-se que o ISC praticamente não se altera com a adição do RCD, enquanto que, pior ainda, a resistência à compressão simples diminui significativamente, em comparação à RCS obtida para o solo puro.

Do ponto de vista dos ensaios realizados com a mistura asfáltica do tipo CAUQ, os valores obtidos de deformação permanente ou a recuperação elástica e de RRT habilitam o RCD para uso no tipo d e mistura testado.

Finalmente, cabe destacar que esta pesquisa serve para corroborar a afirmação de que não se consegue alcançar a estabilização de solos expansivos, empregando-se o método granulométrico, com a simples adição de agregados pétreos, corroborando com a sugestão já conhecida no meio técnico-científico, de que o processo de estabilização química é certamente o mais indicado para emprego em solo de expansão elevada.

Destaque-se, por último, mas, talvez o mais importante, que é a tarefa da formação profissional no âmbito da iniciação científica, onde de fato, são despertados excelentes pesquisadores.

6. PERSPECTIVAS

A pesquisa contribuiu significativamente para o meio científico, mesmo não tendo resultados favoráveis.

É sabido que as pesquisas não se limitam à realizada nesse trabalho. Como foi mencionado ao longo deste trabalho, o processo de estabilização química é certamente o mais indicado e por isso existem sugestões para trabalhos e avaliações mais profundas para o futuro.

Algumas sugestões para futuras pesquisas:

- Realizar os ensaios de Los Angeles (esse já está sendo realizado) e de absorção com o resíduo para dar continuidade à pesquisa com RCD, especialmente voltado para misturas asfálticas;
- Trabalhar juntamente com laboratórios de química, visando o desenvolvimento de substâncias químicas para estabilização de argilominerais;
- Verificar o comportamento do solo com a adição de polímeros na tentativa de melhorar as propriedades do material.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, MARIA JOSÉ. Mecânica dos Solos, volume 1. **Instituto Militar de Engenharia. Fortificação e construção**, 2017.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Industry Glossary of Terms**. Disponível em: <http://www.asphaltinstitute.org/wpcontent/uploads/Asphalt_Industry_Glossary_of_Terms.pdf> Acesso em: 15/04/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. 2016. 5 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. 2016. 3 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. 2016. 12 p. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. 2016. 9 p. Rio de Janeiro.

ATAIDE, FERREIRA, **Estudos da Estabilização de um Solo Expansivo de Ipojuca – PE utilizado em aterros Compactados**, XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas, Velo Horizonte, Minas Gerais, 2016. Disponível em: <<https://www.researchgate.net>> Acesso em 18 de janeiro de 2018.

BARBOSA, N. P.; MATTONE, R.; MESBAH, A., **Blocos de Concreto de Terra: Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção**. Biblioteca SEBRAE Online, 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268431190_Blocos_de_Concreto_de_Terra_Uma_Opcao_Interessante_Para_a_Sustentabilidade_da_Construcao>. Acesso em 18 de janeiro de 2018.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. 504 p.

BURGOIYNE, Dan. **Construction & demolition (C&D) waste diversion in California**. Estados Unidos, Integrated Waste Management Board Disponível em:<

<http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/CaseStudies/DGSDiversion.pdf>, > Acesso em: 18 de janeiro de 2018.

CAMPOS, R. N. **Avaliação da durabilidade em concretos com adição de cinza de biomassa com elevado teor de álcalis**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2015.

CAMPOS, L.E.P &BURGOS,P.C(2004).**Influência da Sucção na Expansão de Massapês** In: REGEO, Porto Alegre - RS. Cd-Rom.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Vol. 1. 1988.

CARVALHO, M. E., CARVALHO, M. P., DALTRO FILHO, J. **Resíduos da construção civil e os desafios para a implementação da resolução CONAMA nº 307/2002: o caso de Aracaju-Sergipe**. Belo Horizonte: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2007.

Cavalcante, E. H., Cavalcanti Júnior, D. De A., Santos, W. J., & Souza Neto, J. B. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe**. In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos - II Geojovem, Nova Friburgo/RJ. 2006.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). **Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

Costa Nunes A.J e Craizer W.(1978) **Micro-ancoragens e Fundações em solos Expansivos**.1º Seminário de mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações.Salvador.pp 16 – 192p.

Costa Nunes A.J e Craizer W.(1978)Micro-ancoragens e Fundações em solos Expansivos.1º Seminário de mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações.Salvador.pp 16 – 192p.

COSTA NUNES, A.J., VASCONCELOS, E.M., PANDOLFI, R.M. **“Ocorrências e propriedades de engenharia de solos expansivos na área do grande Recife”**, In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v.2, pp. 193-209, Olinda/Recife, 1982.

COSTA, SANDRO LUIZ DA. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos – Aspectos Jurídicos e Ambientais**. Aracaju: Evocati, 2011.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning. 6.Edi, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de Pavimentação. Publicação IPR – 719**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT **141 – Pavimentação Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT **139 – Pavimentação Sub-Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

Geraldes, ONU diz que há 75 mil milhões de toneladas de solos degradados todos os anos. **Revista Público**, 2012. Disponível em: <<https://www.publico.pt/2012/03/27/ciencia/noticia/onu-diz-que-ha-75-mil-milhoes-de-toneladas-de-solos-degradados-todos-os-anos-1539549>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2018.

GONDIM, L. M. 2008. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação 171 de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.

GRIGOLI, Ademir S. **O uso de entulho de obra na própria obra como parâmetro de organização de canteiro e redução de custos**. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, IX, 2002, Foz do Iguaçu, PR. Anais... Foz d Iguaçu, PR, 2002.

GUEDES, E. S. R., JUNIOR, W.R. A. **Estudo do Comportamento de Misturas de Solo e Agregado de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Sergipe**. In: VII Simpósio Brasileiro e V Conferência Sul-Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens – XII Geojuvem, Belo Horizonte/MG.2016

JONES, D. E. e Holtz, W. G. 1974. **Expansive soils – the hidden disaster**. Civil Eng., ASCE, New York, NY pp 87-89, Aug. 1973.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassa e concretos.** 147p. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LOTTMAN, R.P. (1978). **Predicting Moisture. Induced Damage to Asphalt Concrete.** Field Evaluation Phase. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. UI Project 677.K29. p. 32,33.

LOURENÇO, Victor. **Estudos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição de Sergipe para utilização em mistura asfáltica tipo CAUQ.** Aracaju: Dissertação (Trabalho de Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Sergipe, 2015.

MENDES, T. A., REZENDE, L. R., OLIVEIRA, J. C., GUIMARÃES, R. C., CAMAPUM DE CARVALHO, J., VEIGA, R. **Parâmetros de uma Pista Experimental Executada com Entulho Reciclado.** Anais da 35ª Reunião Anual de Pavimentação, 19 a 21/10/2004, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004. 11 p.

MILITITSKY, Jarbas, CONSOLI, Nilo Cesar, SCHNAID, Fernando. **Patologia das fundações.** São Paulo: Oficina de textos, 2008.

MORAIS, Camila. **Estabilização de solo expansivo em nossa senhora do socorro/se com adição de polímero industrial.** Aracaju: Dissertação (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2018.

MORALES, Emilio M, and Mark K MORALES. 2004. **“Expansive Soils – Identification, Detection and Remediation Strategies,”** 3–5. Disponível em: www.pgatech.com.ph.

Murthy, V.N.S. (2003). **Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering.** Marcel Dekker, Inc. New York.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive Soils.** Problems and practice in foundation and pavement engineering, 1992.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; SALAS, P. C.; HOFFMANN, 2009. **Seleção de Solos e Métodos de Controle em Construção com Terra – Práticas de Campo.** Rede Ibero-americana PROTERRA. Disponível em: <<https://www.ige.unicamp.br>>. Acesso em 18 de janeiro de 2018.

NG, Charles W. W.; MENZIES, Bruce., 2007. **Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering,** New York: Taylor & Francis Group, 687 p.

OLIVEIRA, J. C.; REZENDE, L. R.; GUIMARÃES, R. C.; CAMAPUM, J. C.; SILVA, A. L. **Evaluation of a flexible pavement executed with recycled aggregates of construction and demolition waste in the municipal district of Goiânia – Goiás.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, R. G. **Análise da deformação permanente e perda por umidade induzida em misturas asfálticas do tipo CAUQ, utilizado agregado reciclados de resíduos de construção e demolição.** Aracaju: Dissertação (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2017.

PAIVA, S. C. De; ALVES, M., & LIMA, D. A. **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal.** Revista Matéria, v. 21, n.2, p. 437-449, out. 2016.

PAIVA, W. de. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** 2009. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PAIVA, W. de. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo.** 2009. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PINTO, A.R.A.G., 2008. **Fibras de Carauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 103p.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de Mecânica dos solos em 16 aulas,** São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SANTANA, F. I. T., **Estudos sobre misturas de agregados reciclados de resíduos da construção civil com solos para utilização em pavimentos.** Aracaju: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2014.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., **Estabilização dos solos com cal e betume.** In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos – São Paulo, abril, 1995.

SANTOS, P. de S. **Ciência e tecnologia de argilas.** 2ª Edição. São Paulo. Edgard Blucher, vol 1, 408 p, 1989.

Shell (2003), 114.

SILVA, C. A. R., **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. Ouro Preto: Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP).

SIMMES, P.R.M., COSTA FILHO, L.M., “**Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano**”, In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, pp.569-588, Rio de Janeiro, 1981.

SIMÕES DE OLIVEIRA, A.G.; JESUS, A.C; MIRANDA, S.B. **Estudo Geológico Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano**. II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos. Disponível em:< <http://www.geotecnia.ufba.br>>. Acesso em 18 de janeiro de 2018.

SINISTERRA, F. Q., **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**. Brasília: Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, 2014.

SOBRAL, H.S., **Contribuição ao estudo de Massapê como solo para construção**, Tese para Cátedra de Matérias de Construção, Universidade Federal da Bahia, Escola de Belas Artes, Salvador, BA, 1956.

SPENCE, R.J.S E COOK, D.J., 1983. **Building Materials in Developing Countries**. John Wiley & Sons editors., 1ed., New York, 335pp.

VALQUÍRIA, Barbosa. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal**. Recife, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br>>. Acesso em 18 de janeiro de 2018.

VARGAS, M., “**The concept of tropical Soils**” In: Proceedings of the International Conference Geomechanics Tropical Lateritic And Saprolitic Soils,1, v.1, pp. 101-134, Brasília, 1985.

VALLEJO, LUIS I. GONZÁLES, AND MERCEDES FERRER. 2011. **Geological Engineering**. Edited by Taylor & Francis Group. Liden: CRC Press/Balkema.

YAN NG, A. K. **Contribuição ao estudo da deformação permanente de misturas asfálticas densas à luz de ensaios de fluência por compressão uniaxiais estática e dinâmica**. São Paulo, SP, 2013. Dissertação (mestrado), Universidade de São Paulo, escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte, 2013.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas. 1997. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP.

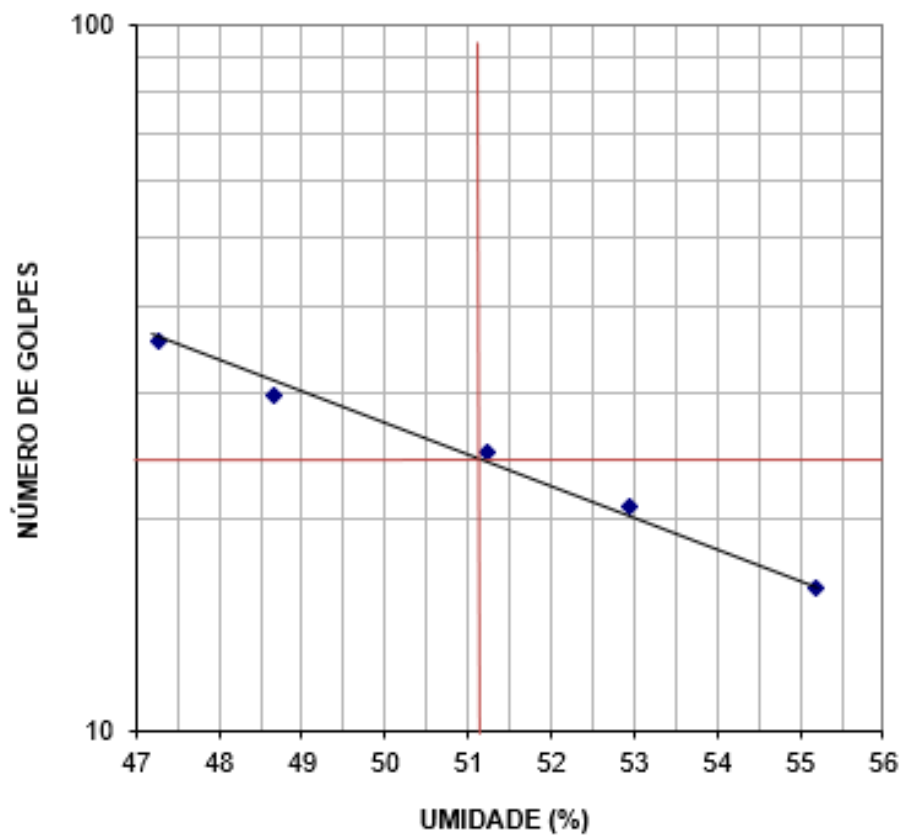
8. OUTRAS ATIVIDADES

A aluna participou no período da sua pesquisa em algumas atividades de extensão, tais como: Projeto de Instalações Elétricas de baixa tensão (07/11/17) e IV Semac MiniCursos PIBIC 2017 (19/11/17). Está prevista a participação no XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2018, a ser realizado de 28/08 a 01/09 do corrente ano, na cidade de Salvador.

APÊNDICE

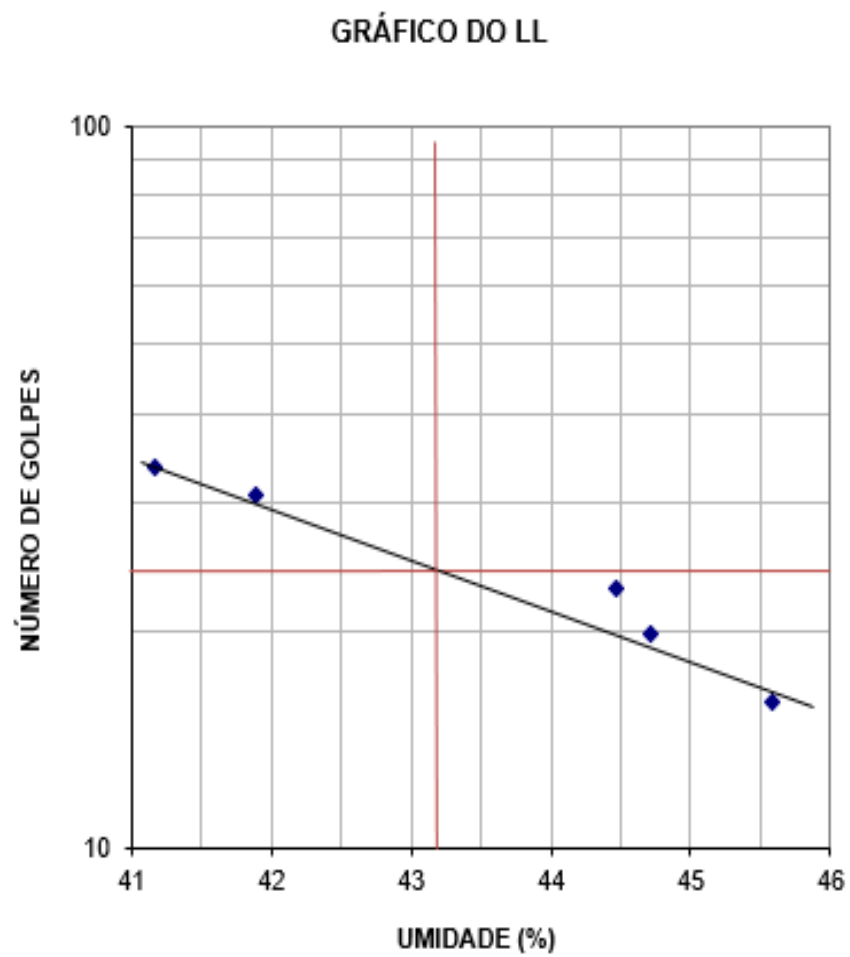
APÊNDICE A - Gráfico de LL com 40% de RCD

GRÁFICO DO LL



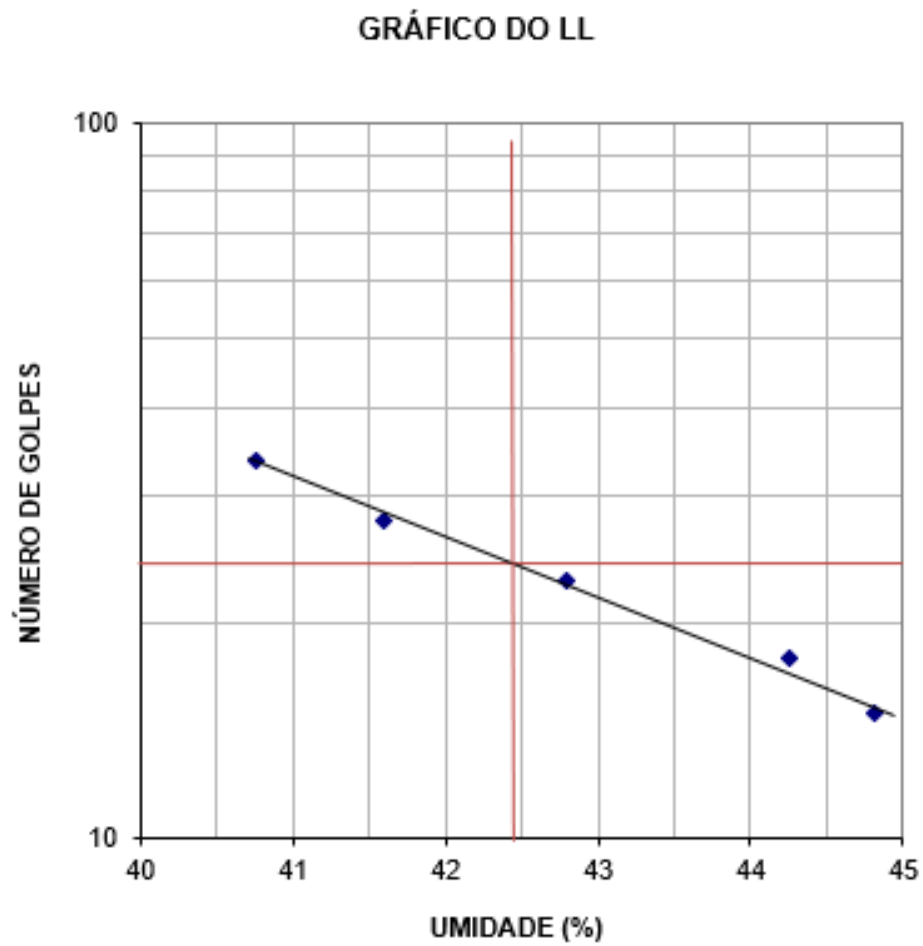
Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B - Gráfico de LL com 50% de RCD



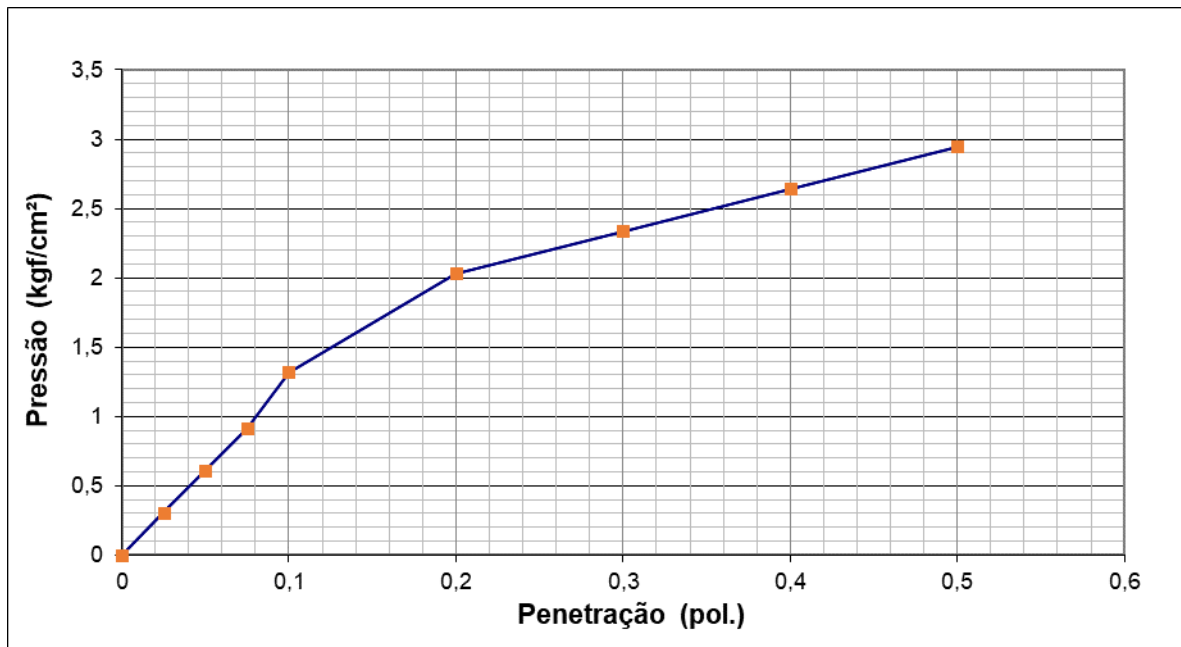
Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C - Gráfico de LL com 60% de RCD

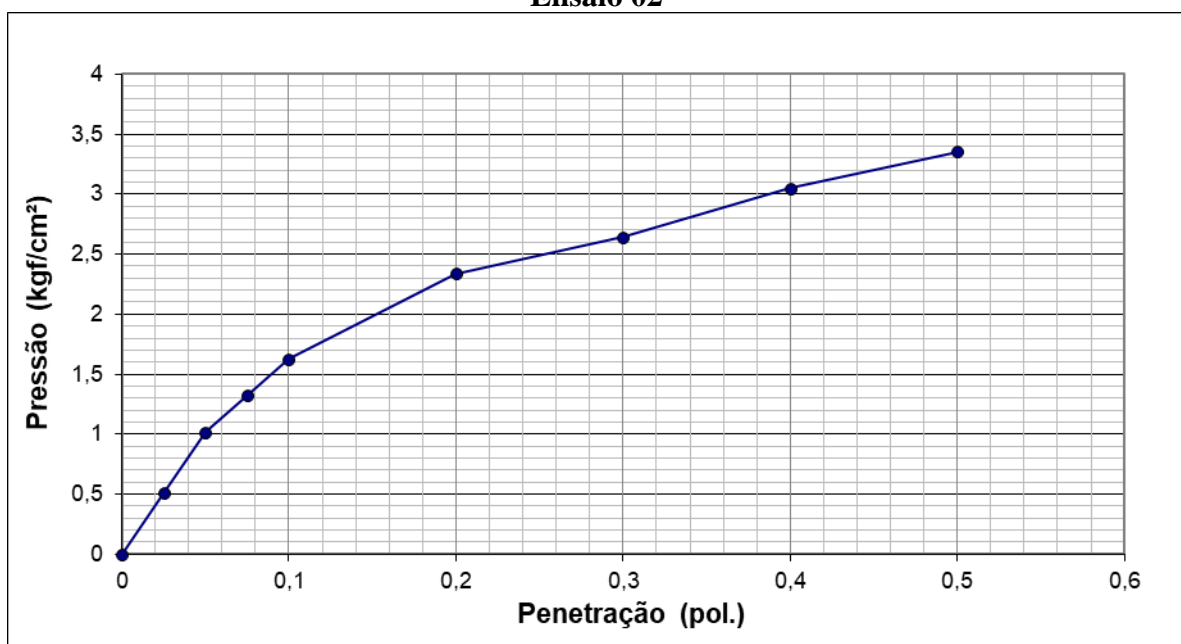


APÊNDICE D - Gráfico de ISC 40% RCD e 60% solo

Ensaio 01

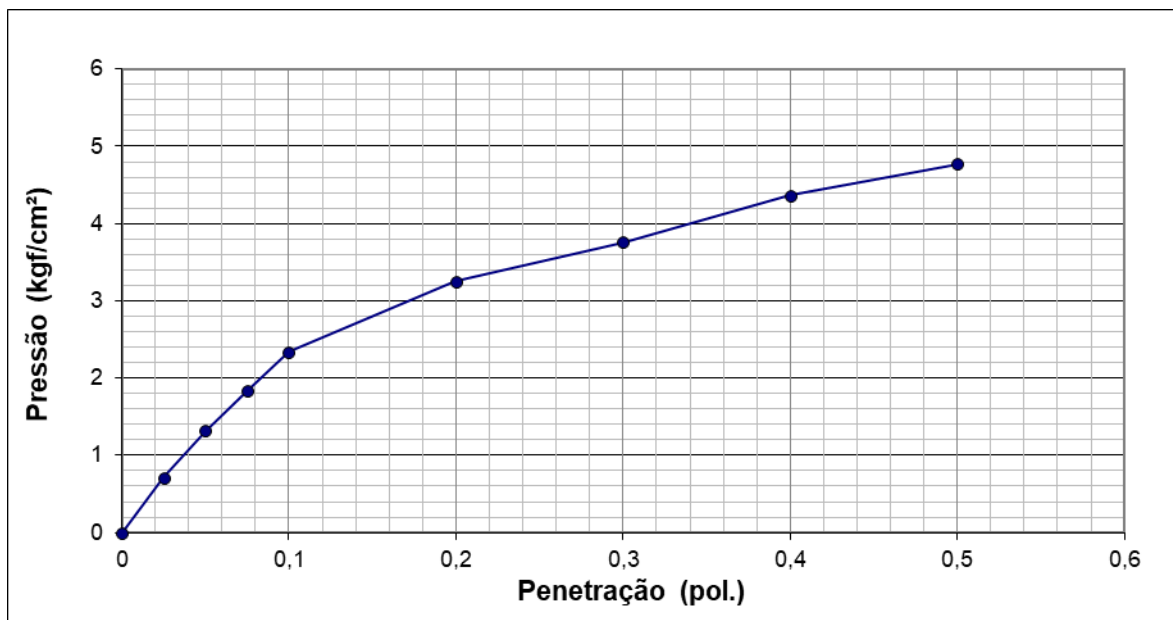


Ensaio 02

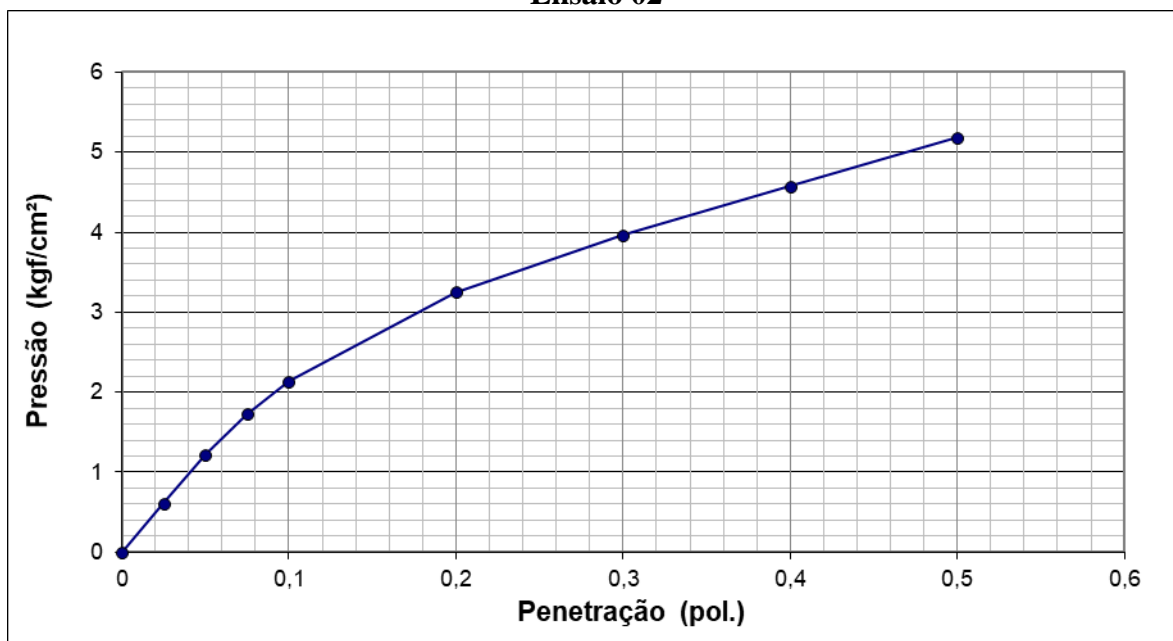


APÊNDICE E - Gráfico de ISC 50% RCD e 50% solo

Ensaio 01

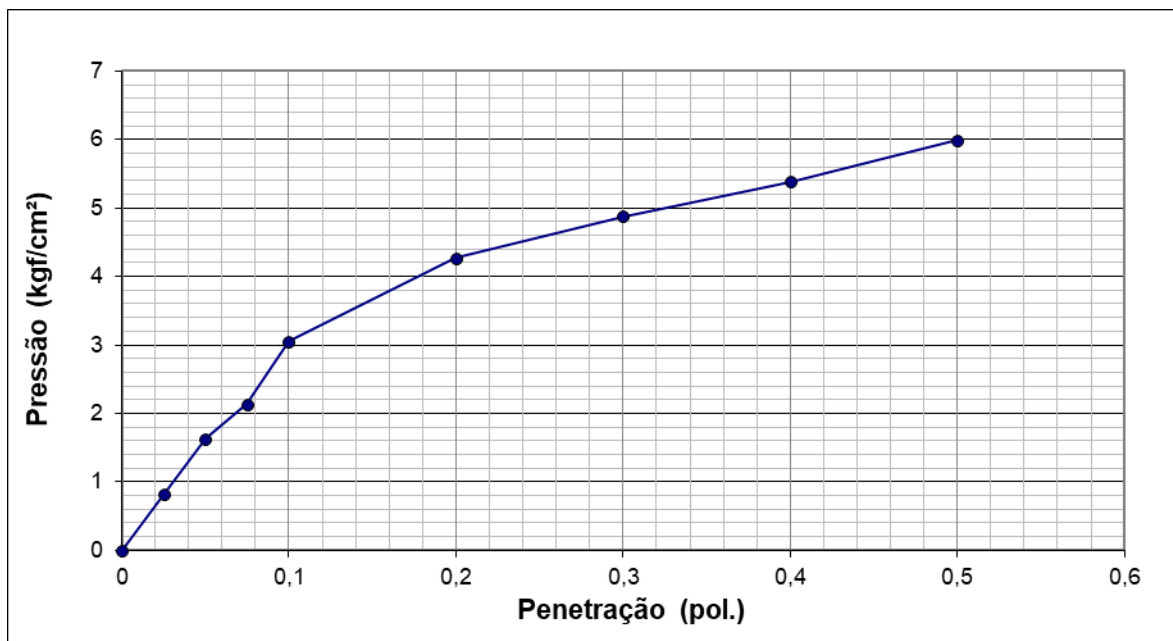


Ensaio 02

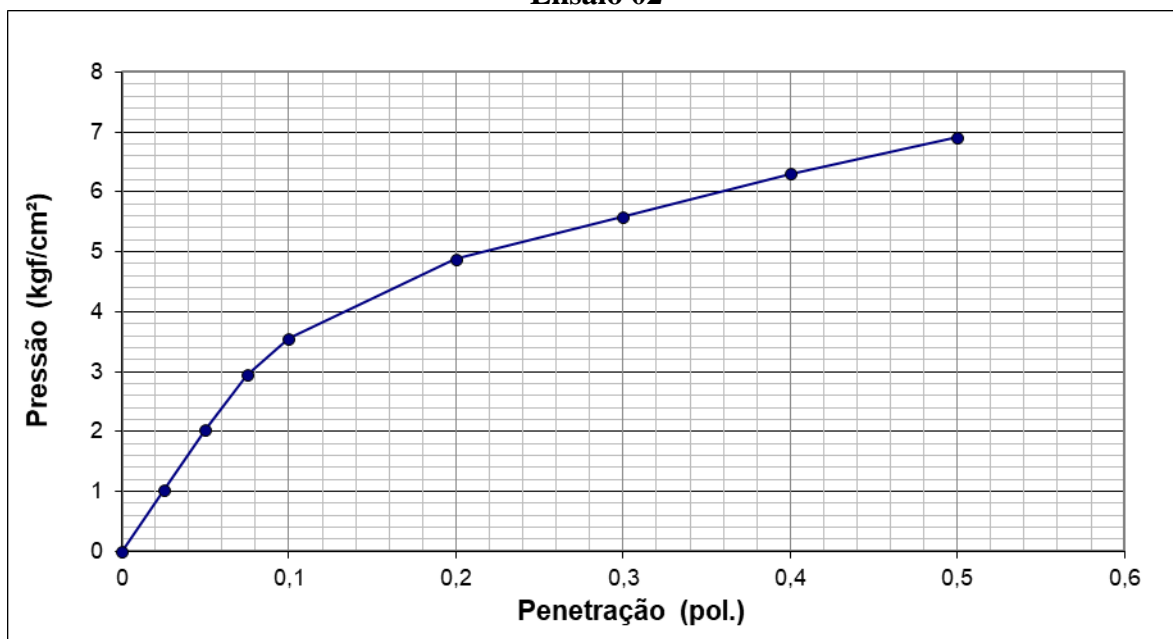


APÊNDICE F - Gráfico de ISC 60% RCD e 40% solo

Ensaio 01

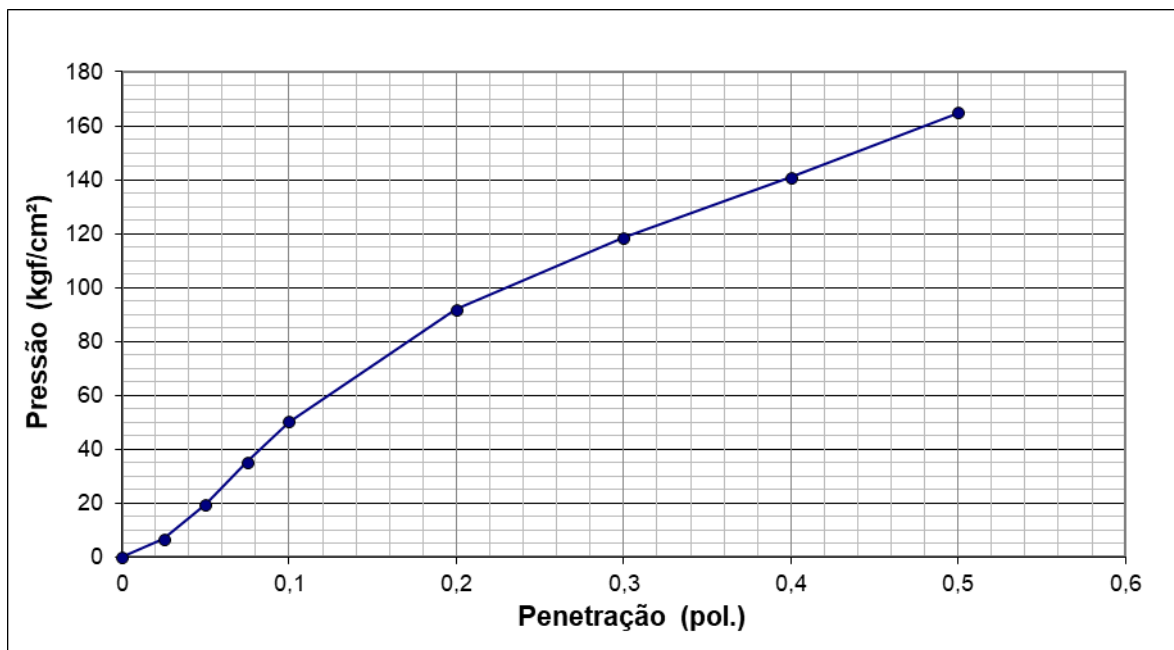


Ensaio 02



APÊNDICE G – Gráfico de ISC 100% RCD

Ensaio 01



Ensaio 02

